

# 原始惑星系円盤におけるダストの帯電： 静電気を考慮した微惑星形成シナリオの 再構築へ向けて



奥 住 聡

〈名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 〒464-0818 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: okuzumi@nagoya-u.jp

ダスト粒子の合体成長は原始惑星系円盤における惑星形成の第一歩と考えられているが、その素過程は十分に理解されていない。原始惑星系円盤は弱くではあるが電離していると考えられ、ダストはプラズマ中と同様に負に偏って帯電するはずであるが、この効果は従来のダスト成長理論では全く無視されてきた。筆者らは、帯電とそれによる静電反発を考慮したダストの合体成長の数値シミュレーションを初めて行った。その結果、円盤には微小なダストの成長が途中で停滞してしまう「成長凍結領域」があり、それが円盤の数 AU から 100 AU もの範囲にわたって存在しうることを発見した。本稿では、プラズマ中でのダスト帯電の仕組みを簡単に解説し、上記の研究成果について紹介する。

## 1. はじめに

1995年に太陽系外惑星が初めて発見されて以来、これまでに400以上の惑星系と500個近い系外惑星の存在が明らかになっている<sup>1)</sup>。われわれの太陽系を含め、これらの惑星系は、形成直後の星を取り囲むガス円盤（原始惑星系円盤と呼ばれる）において作られたと考えられている。現在の標準的な惑星系形成モデル（コア集積モデル）では、サブミクロンサイズの固体微粒子（ダスト）がまず「微惑星」と呼ばれるキロメートルサイズの固体天体にまで成長することが大前提である。ところが、ダストの成長はさまざまな物理が寄与するプロセスであり、その個々の素過程ですら十分に明らかになっていない。筆者は、これまで無視されてきた素過程の一つであるダストの帯電に初めて注目し、微惑星形成シナリオの再構築に取り組んできた。本稿では、筆者のこれまでの研究成果について紹介する。

### 1.1 ダストの合体成長と微惑星形成の「壁」

以下、少し長くなるが、研究の背景にある「微惑星形成問題」について紹介しておく。微惑星形成の基本的な描像は、近年明らかになってきたダストの内部構造進化を加味すると以下ようになる（図1）。まず、サブミクロンサイズのダスト粒子が衝突合体を繰り返し、空隙率の大きいダストの塊へと進化する。ある程度まで成長すると、衝突の際のエネルギーによって塊はしだいに圧縮され始める。圧縮されると表面積が減少して周囲のガスから受ける摩擦抵抗が小さくなるので、塊は合体成長を続けながら中心星の重力によって円盤の赤道面へと「沈殿」していく。沈殿が十分に進行した頃には、塊の大きさは「目に見える」程度の大きさ（だいたいミリメートルからセンチメートル）にまで成長している<sup>2)</sup>。従来の微惑星形成モデルでは、このダスト沈殿層が自己重力によって分裂して一気に微惑星が形成される（重力不安定説<sup>3)</sup>）か、もしくはそのまま塊が衝突合体を繰

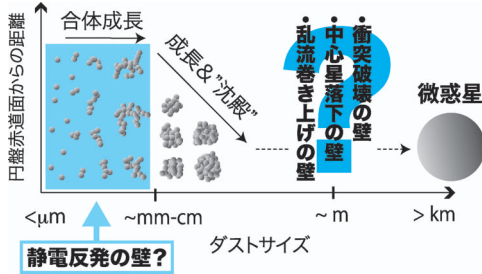


図1 ダストから微惑星へ至るまでの進化の基本的な描像と、微惑星形成に対するさまざまな「壁」。横軸はダストのサイズ（成長段階）であり、縦軸はダストの円盤赤道面への濃集の度合いを表している。本稿では、進化の最初期段階、すなわちダスト微粒子から巨視的サイズのダスト塊が形成されるまでの過程に注目する。

り返して微惑星へと成長する（直接合体成長説<sup>4)</sup>とされてきた。

ところが、詳細な素過程の理解が進むにつれ、巨視的なダストから微惑星に至るまでの経路には数多くの障害（しばしば“barrier（壁）”と呼ばれる）が存在すること明らかになってきた。まず、重力不安定性を通じた微惑星形成では、ダストの層が十分に薄くなる必要がある。ところが、円盤内がわずかでも乱流状態になっていると、ダスト層は赤道面から巻き上がってしまって重力分裂を起こすことができない<sup>4)</sup>（乱流巻き上げの壁）。一方、直接合体成長シナリオの最大の問題点は、「中心星落下」と呼ばれるダスト粒子の軌道進化現象である<sup>5)</sup>。これは、特定のサイズ（地球軌道ではメートルサイズ程度）のダストが、ガスから受ける空気抵抗によって選択的に角運動量を引き抜かれ、非常に速い時間スケール（100-1,000年程度）で中心星に向かって落下してしまうというものである。ダストが円盤内にとどまるためには、上記の時間スケールよりも速く成長し続けなければならないが、これは容易ではないことがわかっている<sup>6)</sup>（中心星落下の壁）。加えて、そもそもメートルサイズといった巨視的なダストの塊が衝突して合体できるのかどうか疑われている。

例えば、地球軌道近辺におけるメートルサイズダストの衝突速度は、円盤乱流の強さによっては秒速100メートル（時速数百キロメートル）などといった高速になりうる。最近の衝突実験<sup>7)</sup>や数値シミュレーション<sup>8)</sup>の結果を見ると、このような高速度ではダストの塊は合体できず、むしろ互いを破壊してしまうと考えられる（衝突破壊の壁）。さらに、ごく最近の衝突実験では、破壊が起らないような比較的低速度な衝突でもダストが合体できずに跳ね返ってしまうことが示唆されている<sup>7)</sup>。この跳ね返りは、ダストの合体成長をセンチメートル程度の段階で失速させてしまう要因になりうる（跳ね返りの壁<sup>9)</sup>）。

このように、ダストが微惑星へと進化するまでの成長経路はまるでわかっていないのが現状である。微惑星の形成は惑星系形成シナリオの根幹をなす前提であり、この詳細が不確定であることは惑星系形成理論の大問題の一つとなっている。

## 1.2 無視されてきた素過程：ダストの帯電

微惑星形成の可能な経路の解明のためにいま必要とされていることは、どのようなプロセスがダストの成長を促進しうるかだけでなく、どのようなプロセスが成長を妨げうるかまで一通り明らかにすることである。これまで特に未解明であったプロセスの一つが、本稿で紹介するダストの静電気である。原始惑星系円盤は外部からの宇宙線やX線によって弱く電離していると考えられている。次節ですぐ紹介するように、電離ガス中に置かれたダストは負の平均電荷を帯びる。プラズマ中でのダストの帯電は星間物理の文脈で初めて理論的に示され<sup>10)</sup>、近年ではプラズマ物理の分野でも理論・実験の双方からよく調べられている。また、ダストの帯電は原始惑星系円盤の電気伝導度を決定づけるプロセスでもあり<sup>11), 12)</sup>、本稿では詳しく述べることはできないが、円盤における磁気乱流の発展と密接にかかわっていることがわかっている。にもかかわらず、微惑星形成の文脈では、ダストの帯電はどういうわけか無視され続けてき

たのである。

プラズマ中でのダスト帯電の一つの重要な帰結は、ダストの帯電量が同符号に偏るということである。同符号に帯電するダストは互いに静電気で反発しあうため、帯電量と衝突速度によってはダストの合体成長が妨げられる。実際、ダスト同士の静電反発は成長の最初期段階、つまりマイクロンサイズから巨視的なダストへと成長するまでの過程で強力に効いてくることを、後の節で明らかにしていく。

以下の節では、ダストが原始惑星系円盤中でのように帯電するのか、そして帯電が合体成長の最初期段階の描像をどのように変えるかを順を追って見ていく。

## 2. 予備的考察：プラズマ中でのダストの帯電と静電反発

次の節で見ると、円盤中でのダストの帯電過程はかなり複雑である。ここでは次節への準備として理想化した状況を考えて、ダストが電離ガス内で負に帯電すること、この帯電が合体成長を大きく阻害しうることの2点をできるだけ簡単に説明していく。

### 2.1 「ダストはプラズマ中で負に帯電する」

プラズマ中にダスト粒子が置かれた状況を考えてよう(図2)。いまは簡単のため、プラズマは中性で、ダストの帯電によってイオンと電子の数密度は変化しないとする。ダスト粒子が単位時間あたりどのくらい帯電するかは、イオンの入射による正の電流と、電子の入射による負の電流の差し引きで決まる。イオンと電子の数密度が等しいので電流も差し引きゼロと思われるかもしれないが、そうではない。というのは、イオンは電子に比べて質量が大きい分、より小さな熱速度(質量の平方根に反比例)をもつためである。例えばイオンが $H^+$ であればその熱速度は電子に比べて約

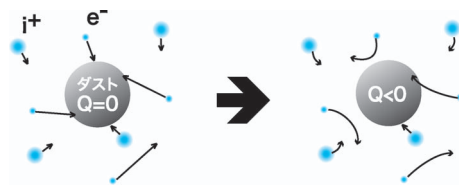


図2 電離ガス中でのダストの帯電機構を表す概念図。  $i^+$ ,  $e^-$  はそれぞれイオンと電子であり、細線矢印はそれぞれの熱運動を表す。  $Q$  はダストの帯電量である。電子はイオンに比べてより速い熱速度をもつため、電気的に中性なダスト粒子には(単位時間あたりに)電子がより多く入射する(左図)。この結果ダストは、イオンと電子の入射量が静電気力によって等しくなるまで負に帯電する(右図)。

43倍遅く、原始惑星系円盤においてより豊富な  $HCO^+$  などであれば100倍以上遅い。したがって、電子とイオンの個数密度が同じだとしても、ダスト粒子への入射フラックス(=数密度×速度)は電子のほうがおよそ100倍大きいのである。このため、はじめ帯電していないダストを電離ガスの中に置くと、ガスからダストへは正味で負の電流が流れ、ダストはだんだんと負に帯電していく。ある程度帯電してくると、電子がダスト表面に到達しづらくなっていくので、電子のダスト表面上での入射フラックスはだんだんと減少し、やがてイオンの入射フラックスと釣り合うようになる\*1。この状態がダストの平衡帯電状態である。

平衡状態でのダストの帯電量は、(球状粒子であれば)厳密に計算できるが<sup>10)</sup>、ここではより簡単な議論によって見積もってみる。ダストの表面電位(表面での静電ポテンシャル)を  $V (<0)$ 、素電荷量を  $e$  とすると、ダスト表面に到達できる電子は、 $-eV (>0)$  より大きな運動エネルギーをもつものだけである。ところで、ダストが帯電していない場合は、電子のフラックスはイオンのそれに比べて約100倍も大きいのであった。このこと

\*1 イオンがよりダスト表面に到達しやすくなる効果もあるが、これは電子が到達しにくくなる効果に比べると弱い。

から、両者のフラックスを釣り合わせるには、「ほとんど」の電子、つまり運動エネルギーが平均熱エネルギー ( $\sim kT$ ) 程度のありふれた電子はすべて静電反発によってはじかなければならないことがわかる。よって、帯電平衡状態におけるダストの表面電位は

$$V \sim -\frac{kT}{e} \sim -10 \left( \frac{T}{100 \text{ K}} \right) \text{ mV} \quad (1)$$

程度であると見積もることができる。例えば、 $T \sim 100 \text{ K}$  (太陽系惑星軌道での円盤ガス温度に相当) であれば、ダストの表面電位は  $-10 \text{ mV}$  のオーダーである。より厳密な計算<sup>10)</sup>によると、 $V = -\Gamma kT/e$  となり、数係数  $\Gamma$  はイオンの質量に弱く依存するが典型的には 2-3 程度である。いずれにしても、表面電位はダストのサイズによらずに決まる。また、半径  $a$  の球の静電容量が  $C = a$  (CGS 単位系) であることを使うと、ダストの帯電量  $Q = CV$  はその半径に比例することがわかる。表面電位が  $-10 \text{ mV}$  で半径が  $0.1 \mu\text{m}$  であれば、帯電量は電子数個分である。

## 2.2 「プラズマ中で帯電するダストは、熱運動によって合体成長し続けることができない」

帯電量がわかったので、次に、帯電するダストどうしの静電反発について考えてみよう。簡単のため、2体のダストのサイズを等しいとする。両者が接触するぎりぎりまで近づいたときのクーロン反発エネルギーは  $E_{el} = Q^2/(2a) = aV^2/2$  である。両者が静電反発を乗り越えて合体できるためには、相対運動のエネルギー  $E_{kin}$  が上記の  $E_{el}$  より大きくなければならない。ここで、2体のダストの相対運動が熱運動 (ブラウン運動) だけによって引き起こされている状況を仮定しよう。すると、相対運動エネルギーは2体のサイズによらずに  $E_{kin} \sim kT$  である。このとき、式 (1) を利用すると、運動エネルギーと静電エネルギーの比は  $E_{el}/E_{kin} \sim akT/e^2 \sim (a/0.1 \mu\text{m})(T/100 \text{ K})$  と書ける。これより、今考えている状況では  $0.1 \mu\text{m}$  より大きいダストどうしでは静電反発エネルギーが運

動エネルギーを上回ってしまう、つまり合体できないことがわかる。 $0.1 \mu\text{m}$  といえば星間ダストの典型的なサイズである。つまり、もし仮に原始惑星系円盤がここで仮定したような状況であったら、ダスト成長、ひいては惑星形成はその第一歩からつまづくことになる!

もちろん、原始惑星系円盤におけるダストの帯電と成長はもっと複雑である。まず第一に、円盤はプラズマとは言いがたいほど電離度が極めて低く (後述)、ダストの群れが十分に帯電する前にガス中の電子が“品切れ”になってしまう場合がある。これはダストの帯電と静電反発を抑える効果がある。第二に、円盤内のダストの相対速度は沈殿や円盤乱流などによっても駆動されるので、衝突エネルギーは熱エネルギーほど小さいわけではない。ダストの成長に対する静電気の効果を実験的に調べるためには、これらの効果を考慮しなければならない。

## 3. 原始惑星系円盤におけるダストの帯電と電子欠乏効果

いまわれわれが知りたいのは、円盤中でダスト粒子の群れがどの程度帯電するかである。2.1 節の議論は、「ダストが負に帯電しても電離ガスの電気的中性がほとんど崩れない」という仮定に基づいている。この仮定は、周囲の電子・イオンの数密度が十分高いときにのみ成り立つ。一方、原始惑星系円盤の大部分 (中心星近傍を除く) は低温環境 ( $\ll 1,000 \text{ K}$ ) であり、熱的な電離は基本的に無視できる。主要な電離源は円盤外部から飛来する高エネルギー粒子 (宇宙線や X 線など) であり、円盤ガスはこれらによって非常に弱く (電離度にして  $10^{-10}$  よりはるかに低いレベルで) 電離するのみである。このような環境では、ダストの群れがわずかに負に帯電するだけでも、周囲の自由電子の数がイオンの数に比べて著しく減ってしまうことがある。自由電子の数が減少すると、ダストに入射する負の電流が減るので、結果として

ダストの帯電量は2.1節で見た場合(式(1))よりも低い値で平衡となる。これは言い換えれば、ダストが十分に帯電する前に、周囲の自由電子が“品切れ”になってしまう場合があるということである。このような効果を「電子欠乏効果」と呼ぶことにしよう。ダストの帯電量が抑えられれば、ダスト粒子間の静電反発は当然弱まるので、電子欠乏効果はダストの成長を考えるうえで非常に重要である。

原始惑星系円盤におけるダストの平衡帯電量を定量的に求めるのはやっかいな作業である。というのも、ダストの帯電量とイオン・電子の数密度が互いに独立でなく、中性ガスの電離、イオンと電子の気相再結合、そしてダストの電離粒子捕獲を同時に計算しなければならないからである。従来、このような解析は数値的にのみ行われてきた<sup>11), 12)</sup>が、平衡解の一般的な振舞いはよく理解されていなかった。幸運にも、筆者はこの問題がうまく解析的に解けることを発見し、電子欠乏効果がどのような条件で起こるかを一般的に示すことができた<sup>13)</sup>。まずは、その一般的な傾向について簡単に紹介し、その後で具体的な例を見ていただくことにしよう。

電子欠乏効果がどの程度効くかは、ガス電離源の量だけでなくダストのサイズ分布にも依存する。これは、ダストの静電容量がその半径に比例するためである。ダストのサイズ分布が決まると、その集団がもつ総静電容量(半径の総和)  $C_{\text{tot}}$  が決まる。再び表面電位を  $V$  ( $< 0$ ) とすると、ダスト集団の総負帯電量は  $-C_{\text{tot}}V$  である。ガス・ダスト混合系が全体として電氣的に中性なら、この総帯電量は気相中のイオンの運ぶ正電荷量  $en_i$  ( $n_i$  はイオンの数) を超えることはできない。したがって、表面電位の大きさ  $|V|$  は  $en_i/C_{\text{tot}}$  より大き

くなれないことがわかる。実は、電子欠乏状態とは、この上限値が式(1)の値を下回ってしまう状態である<sup>13)</sup>。このように、電子欠乏によって表面電位が抑えられるかどうかは、総静電容量  $C_{\text{tot}}$  の値、ひいてはダストのサイズ分布がどうなっているかによって決まってくる。

「静電容量＝半径」であることは非常に重要である。一般に、個々のダストの半径は成長とともに増加するが、それらの総和は一般に成長とともに減少する。したがって、ダストは成長するにつれて低い総静電容量をもつようになり、結果的に電子欠乏効果は弱くなる。また、大きなダストと小さなダストが共存しているような環境では、(質量にして)ごくわずかな量の小さいダストが非常に大きな静電容量を提供する場合がある。そのような場合では、微小なダストがガス中の電子を大量に捕獲し、結果として大きいほうのダストの帯電量を小さく抑えるといったことが起こりえる。この事実は後の4節で紹介する「置き去り成長」と呼ばれる現象のエッセンスとなる。

ここで帯電状態の進化の一つの具体的な例を紹介しよう。図3の上図は、中心星から5 AUの軌道(ほぼ木星軌道に相当)でダストが均一に成長した場合の表面電位の進化をプロットしたものである。ここでは、ガス密度と温度は標準的な円盤モデル(いわゆる林モデル<sup>14)</sup>)のものを採用し、電離源は宇宙線を仮定している\*2。この例では、中性プラズマ極限(電子欠乏の起きていない状態)でのダストの平均表面電位はおよそ-30 mVである(図の破線)。ダストのサイズがミクロン程度のときは電子欠乏効果は著しく効き、平均表面電位は中性プラズマの場合に比べて3桁も低い値となる(平均負帯電量は1素電荷に満たない)。一方、ダストが成長するにつれて欠乏効果は弱ま

\*2 また、ダストが低速度衝突を通じて低内部密度の(フラクタルな)構造に進化することを仮定している。そのため、図の横軸のダスト質量が半径の3乗ではなく2乗に比例していることに注意されたい。この仮定は、(いま考えている)ダスト成長の最初期段階では現実的と考えられているので採用したが、電子欠乏効果にとって本質的というわけではない。

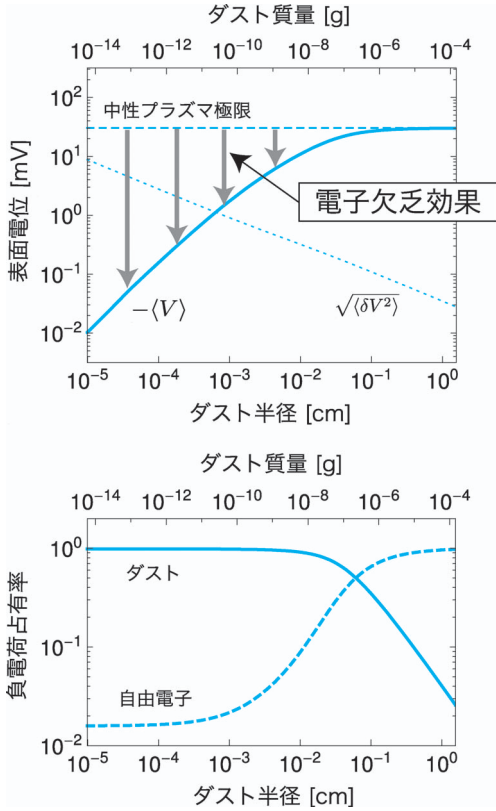


図3 ダストの均一成長に伴う、ダストの帯電状態とガスの電離状態の進化の例。標準的な原始惑星系円盤モデル(林モデル)を採用し、円盤内の位置は中心星から5 AU離れた場所の赤道面上を仮定している。[上図]それぞれの成長段階におけるダストのサイズ(横軸)と表面電位(縦軸)。実線と点線はそれぞれ表面電位の平均 $\langle V \rangle$ と標準偏差 $\sqrt{\langle \delta V^2 \rangle}$ を表す( $\langle V \rangle < 0$ に注意)。破線は中性プラズマ中でのダストの平均表面電位(2節参照)である。サイズが小さい段階ではダスト全体の総静電容量が大きいため、個々のダストの電位(あるいは帯電量)は中性プラズマ中に比べて小さくなる(電子欠乏効果、灰色の矢印参照)。[下図]各成長段階における、自由電子とダストの負電荷占有率。電子欠乏段階ではダストが系の大部分の負電荷を運んでいるのがわかる。

り、だいたい mm サイズまで成長すると表面電位は中性プラズマ中とほとんど変わらなくなる(このとき負電荷量は  $10^4$  素電荷程度)。図3下図は、ガス中での負電荷の占有率を各成長段階ごとにプロットしてある。電子欠乏効果が効いている段階では、ガス中の負電荷はほとんどがダストによって運ばれており、自由電子の数密度はイオンに対して100分の1くらいにまで低下している(実は、この比はだいたい熱速度の比の逆数であり、電子の数はこれ以上少なくなるらない)。

ここまでは表面電位の平均値に注目して話を進めてきたが、実際は電位はある分布をもっている<sup>13)</sup>。図3上図に、電位のゆらぎ $\sqrt{\langle \delta V^2 \rangle}$ の進化を点線でプロットしてある。図からわかるように、サイズの小さい段階では電位のゆらぎは平均値に比べてかなり大きいですが、成長とともにゆらぎの効果はどんどん無視できるようになる。

次の節へ移る前に、前節で行ったような運動エネルギーと静電反発エネルギーの比較をしておこう。図4は、図3と同じ条件下で静電反発エネルギー  $E_{el} = aV^2/2$  を計算し、これをダスト2体間の相対運動のエネルギー  $E_{kin}$  と比較したものである。ここでは前節と異なり、ダストの相対運動は熱運動に加えて円盤のガス乱流によっても駆動されると仮定している。一般に、ダストの相対運動はダストのサイズが小さいうちは熱運動に支配されるが、ある程度成長すると乱流駆動の運動に支配されるようになり、相対運動のエネルギーは増加を始める。この例では、相対運動エネルギーの増加はダスト半径が  $50 \mu\text{m}$  くらいになったところから始まっている(図4の黒矢印)。一方、静電反発エネルギーは、成長初期の段階では電子欠乏効果によって著しく抑えられているものの、均一成長を通じて急速に中性プラズマ極限へ回復し、サイズが  $10 \mu\text{m}$  程度に至ったところで相対運動エネルギーを上回ってしまう。つまり、ここでは電子欠乏による静電エネルギーの抑制と非熱的な運動による相対運動エネルギーの増加の両方を考

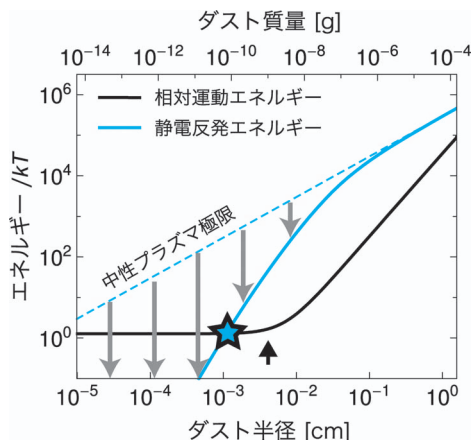


図4 ダストの均一合体成長に伴う、5 AUの軌道における相対運動エネルギー  $E_{kin}$  と静電反発エネルギー  $E_{el}$  の進化。円盤モデルは図3の例と同じものを仮定している。相対運動は、サイズが小さいうちは熱運動（ブラウン運動）に支配されるが、サイズがある程度大きくなると（この例では  $50 \mu\text{m}$  程度、黒色矢印参照）ガス乱流駆動の運動に支配されるようになる。静電エネルギーは、サイズの小さいうちは電子欠乏効果によって著しく抑えられる（灰色の矢印、図3も参照）が、成長とともに急速に中性プラズマ極限へ回復していく。この結果、ダストサイズが  $10 \mu\text{m}$  程度に至った段階（星印）で  $E_{el}$  が  $E_{kin}$  を上回ってしまう。

慮したが、それでもなお合体成長に対する静電反発の影響は無視できなさそうというわけである。

#### 4. ダストのサイズ分布の進化の3形態：均一成長・成長凍結・置き去り成長

前節では、ダストは均一に成長すると仮定したが、実際にはサイズ分布はある程度の広がりをもつ。微惑星形成の観点からは大きなダストの数に興味があるが、一方で帯電を考えると小さなダストの数も重要である。というのも、前節で述べたように、微小なダストもそれなりの個数があれば

系の総静電容量に大きく寄与し、より大きなダストの帯電量を抑制しうるからである。したがって、帯電の合体成長に対する影響を十分に理解するためには、帯電状態の進化とサイズ分布の進化を同時に追跡する必要がある。

ここでは、筆者が北海道大学の田中秀和氏と共同で行った、帯電するダストの合体成長の数値シミュレーション<sup>15)</sup>を紹介する。このシミュレーションでは、ダストの集団の成長進化を合体成長方程式（スモルコフスキー方程式）と呼ばれる一種の反応方程式を解いて計算している。この計算法は、ダストの群れを一つのサイズ分布として表現し、各サイズのダストの合体を統計的に計算するものである。この計算法は個々の粒子の成長を追跡するよりもはるかに膨大な数のダストの成長を取扱うことができ、ダストの合体成長を調べる有力な手法としてよく使われている<sup>2)</sup>。われわれの計算の新しい点は、サイズ分布の進化と同時に帯電量の進化も計算し、静電反発による衝突断面積の減少を矛盾なく考慮している点である。

図5にシミュレーションのいくつかの結果を示す。このシミュレーションは、円盤内の異なる場所（中心星から1 AUと5 AUの距離）の赤道面におけるダストのサイズ分布の時間進化を、帯電がある場合とない場合の両方について計算したものである\*<sup>3</sup>。前節と同じ円盤モデルを採用し、電離源は宇宙線を仮定している。図中の点線は、等質量のダストどうしの相対運動がガス乱流に支配され始めるサイズ（図4の黒矢印に対応）を表す。破線は、均一成長を仮定した場合に静電反発エネルギーが相対運動エネルギーを上回り始めるサイズ（図4の星印に対応）を表す。均一成長を仮定すると、1 AUでも5 AUでもあるサイズで静電反発エネルギーが相対運動エネルギーを上回ってしまうことを覚えておいていただきたい。

まず5 AUの例から紹介しよう。帯電を考慮し

\*<sup>3</sup> この計算では、ダストの内部密度進化も理論モデル<sup>16)</sup>を用いて同時に解いており、結果としてダストの質量は半径のおよそ2乗で推移している。

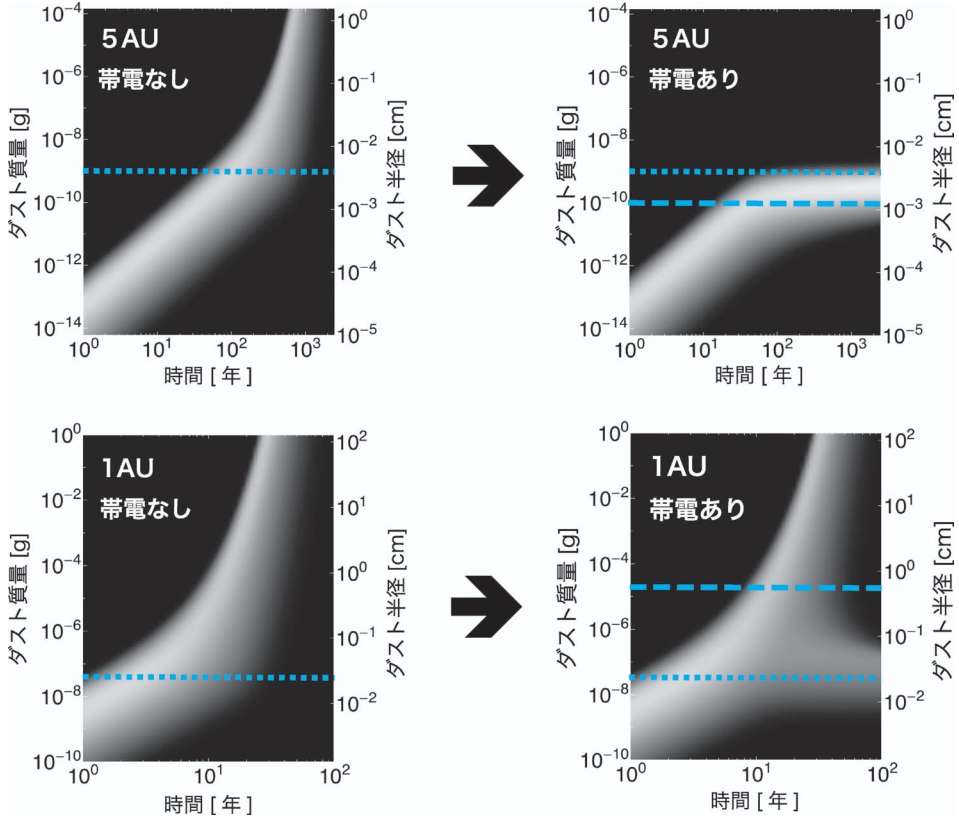


図5 ダストの合体成長に伴うサイズ分布の進化の数値シミュレーションの例。横軸は経過時間、縦軸はダスト粒子の質量  $M$  および半径  $a$  である。サイズ分布（ダスト質量密度分布）の時間進化が白い軌跡で描かれている。水色の点線は運動が乱流に支配され始めるサイズを、破線は均一成長を仮定した場合に静電エネルギーが運動エネルギーを上回り始めるサイズを表す（それぞれ図4の黒色矢印、星印に対応）。5 AU の軌道では、帯電を考慮すると、系全体の成長進捗がサイズ  $10\mu\text{m}$  付近で停止する（図4も参照）。1 AU の軌道では、帯電を考慮すると、ある段階で小さなダストの成長が停止し、大きなダストだけが成長し続けるような2極分化現象（置き去り成長）が起こる。このとき、系の大部分の静電容量を担っているのは小さなダストだが、系の大部分の質量を運んでいるのは大きなダストである。

ない場合（図5の左上図）、ダストは1,000年程度の時間をかけてセンチメートルサイズにまで成長する。各時刻におけるサイズ分布の幅は、いずれの成長段階でも比較的均一な分布であり、特に前半のブラウン運動で成長する段階（点線より下側）では特に分布は狭い。これは、小さいダストほど速い熱速度をもち、したがって速く成長するためである。後半の乱流速度による成長段階へ入ると、分布は多少広くなる。

これに帯電の効果を入れるとどうなるか。図5の右上図を見ると、サイズ分布の時間進化が

$10\mu\text{m}$ （破線）から急速に鈍っているのがわかる。これは、均一な成長ができなくなった段階で、ダストの成長が全体的に停止してしまったことを意味する。この計算ではダストの熱速度の分散も考慮に入れているので、サイズ分布の進化は厳密には停止していないが、（ガス円盤の典型的な寿命とされる）1,000万年まで待ってもサイズ分布はこれ以上ほとんど進化しない。このような進化形態を「成長凍結」と呼ぶことにしよう。

帯電の効果を円盤の別の場所で見ると面白い。図5の下図は1 AUでの成長進化の結果である。



帯電のない場合（左下図）の成長の仕方は、定性的には5 AUと同じである。ところが帯電を考慮に入れると（右下図），進化は5 AUの場合と定性的にも異なってくる。何と，サイズ分布がある段階を境に2極に分化するのである。図からわかるように，サイズの大きなダストの集団は帯電がない場合と同じように成長し続け，サイズの小さいほうの集団は成長が停止したままとする。さらに詳しく調べると，大きいダストは大きいダストどうしの衝突合体のみで成長しており，小さい側のダストをほとんど捕獲していないことがわかる。このような進化形態を「置き去り成長」と呼ぶことにしよう。

置き去り成長では，成長の停止した微小なダストが，より大きなダストの成長に対して非常に重要な役割を果たしている。系の質量と静電容量の大部分を担っているのが2極のうちどちらであるかを調べてみると，質量を担っているのが大きいダストであるのに対し，静電容量を担っているのは小さいほうのダストであることがわかる。しかも，小さいほうのダストは成長が停止してしまっているので，系の総静電容量はほとんど減少しておらず，大きなダスト成分が成長してもガス中で電子欠乏状態が続いたままになっている。このことは結局，大きいダストどうしの静電反発を弱め，それらがさらに成長し続けることを可能にしている。つまり，置き去り成長では，一部のダストが犠牲になって（＝電離ガスの吸収剤となって）他のダストの成長を救っているのである。犠牲になっているダストには同情を禁じえないが，惑星形成過程としてはたいへん重要である。

それではなぜ1 AUでは置き去り成長が実現され，5 AUでは実現されなかったのだろうか。実はこの違いは，(1) 相対速度が非熱的な運動に支配され始めるのと，(2) 静電エネルギーが運動エネルギーを上回り始めるののどちらが先か（つま

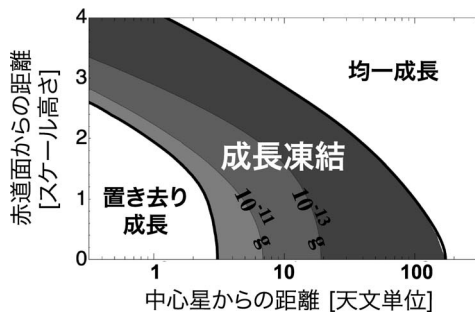


図6 数値シミュレーションによって得られた，原始惑星系円盤でのダストの成長マップ。横軸は中心星からの距離 $r$ ，縦軸は赤道面からの距離を表す（赤道面からの距離を各 $r$ でのスケール高さで規格化していることに注意）。成長凍結領域の各位置におけるダストの最大サイズは等高線で示されている。

り，図5の点線と破線の上下関係）によって決まっている。通常の円盤では，中心星のより近くほどガスの面密度は高いので，赤道面付近に到達可能な電離源（宇宙線やX線）の量は内側ほど小さい。この結果，1 AUでは5 AUに比べてダストの帯電を引き起こす電離ガスの量がより少なく，電子欠乏効果がより強力に効いている。5 AUでは上記(2)のほうが先に起こっており，そのときの運動エネルギー $\sim kT$ は依然としてサイズによらず一定である。これに対し，静電エネルギー $\sim aV^2 \propto aC_{tot}^{-2}$ は\*4，仮に総静電容量 $C_{tot}$ がこれ以上減少しなかったとしてもダストサイズ $a$ とともに増加する。つまり，均一成長ができなくなった頃には，サイズ分布がいかに分化しようとも成長可能なダスト成分を生み出すことができなくなっているのである。一方，1 AUでは，上記(1)が先に起こっており，静電反発が効き始めた頃には運動エネルギーが質量とともに増加するフェーズに入っている。この段階では，均一に成長することは不可能でも，系の総静電容量をそれ以上減らさない程度の量のダストが成長し続けることは許されているのである。

\*4 電子欠乏効果が効いているので  $V \sim -en_i/C_{tot}$  である (3節参照)。

このように、ダストの合体成長の運命は、運動エネルギーがどれだけ早い段階から増え始めるか、電子欠乏効果がどれだけ長い間効き続けられるか、の2点で決まっている。図6は、数値シミュレーションから得られた、原始惑星系円盤におけるダストの「成長マップ」である<sup>17)</sup>。横軸は中心星からの距離 $r$ で、縦軸は赤道面からの距離を各 $r$ でのスケール高さ(=ガス音速/ケプラー角速度。林モデルでは $r$ の3-10%程度)で規格化したものである。ここで、「均一成長」と印した領域は、帯電を考慮しても均一に成長し続けることが可能な領域である。図からわかるように、円盤の上層部もしくは中心星から遠い領域(100 AU以遠)ではダストは静電反発を振り切って成長できる。これは、ここではガスが薄いためにガス抵抗が弱く、ダストが熱速度に比べて大きな運動速度をもちやすいからである。逆に、円盤の数AUより内側の赤道面付近では、「置き去り成長」モードのおかげでダストの成長が可能である。この領域は上で述べたように、ガスの面密度が高く、電離源である宇宙線やX線が届きにくい領域である。そして、ガスの密度が低すぎもなく高すぎもないところが「成長凍結」の起こる領域であり、赤道面で見ると何と数AUから100 AUにもわたる。

## 5. まとめと課題

本稿では、原始惑星系円盤でのダストの成長に対する静電障壁について解説してきた。ダストは円盤中の電離ガスを捕獲して、負の平均電荷を帯びる。この同符号に偏った帯電は、ダスト間の静電反発を引き起こす。ダストが静電反発を振り切って成長し続けられるかどうかは、帯電量がガス電離の弱さによってどれだけ抑えられるか(電子欠乏効果)、ダストの相対速度が赤道面への沈殿や円盤乱流によってどれだけ誘起されるかの2点に大きく依存する。この2点を考慮に入れた筆者らの数値シミュレーションによって、微小なダストの成長が静電反発によって停止してしまう領

域が円盤の数AUから100 AUもの広きにわたって存在しうることが明らかになった。この結果は、「ダストの成長は少なくとも、巨視的なサイズに至るまでは困難なく進行する」という従来の認識を覆すものである。冒頭で述べたように、現在の微惑星形成シナリオはすでに多くの理論的問題点を抱えており、これらの“壁”をすべてうまく回避する進化経路は依然として明らかでない。いずれにせよ、われわれの得た結果は、これまでの微惑星形成モデルに対して大胆な修正が必要であることを示唆している。

一方、理論と観測との整合性を考えると、静電障壁の存在はむしろ好都合かもしれない。年齢が100万年程度の若い星に付随する円盤は、比較的強い中間赤外放射をもつことが観測から知られている<sup>18)</sup>。このことは、ミクロンサイズ程度の非常に微小なダストが、中心星からあまり遠くないところで100万年にもわたってある程度保持されていることを示唆する。ところが理論計算を行うと、仮にダストが何の障害もなく成長し続けた場合、ミクロンサイズ程度のダストが100万年よりはるかに短い時間スケールで成長してなくなってしまふのである(このことは図5の左図からも見てとれる)。このことから、このような微小なダストが何らかの理由で成長を阻害されている、もしくは(より大きなダストの破壊などを通じて)円盤内に再供給されているのではないかと考えられている<sup>19)</sup>。ダストの静電反発は、このような微小ダストの円盤内保持に対して少なからず役割を担っているかもしれない。今後、より詳細な理論のモデル化を通じて観測との整合性を調べていく必要があるだろう。

## 謝 辞

本稿で紹介した研究の一部は、北海道大学の田中秀和准教授、東京工業大学の竹内 拓研究員、そして筆者の指導教員であった京都大学の阪上雅昭教授との共同研究である。本研究に関し、筆者は日本学術振興会特別研究員研究奨励費(22・7006)の助成を受けている。

## 参 考 文 献

- 1) 最新の情報はウェブサイト“The Extrasolar Planets Encyclopaedia” (<http://exoplanet.eu>) から得ることができる。
- 2) Nakagawa Y., Nakazawa K., Hayashi C., 1981, *Icarus* 45, 517
- 3) Goldreich P., Ward W. R., 1973, *ApJ* 183, 1051
- 4) Weidenschilling S. J., Cuzzi J. N., 1993, in *Protostars and Planets III*, ed. by E. H. Levy & J. I. Lunine (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 1031
- 5) Weidenschilling S. J., 1977, *MNRAS* 180, 57
- 6) Brauer F., Dullemond C. P., Henning Th., 2008, *A&A* 480, 859
- 7) Güttler C., Blum J., Zsom A., Ormel C. W., Dullemond C. P., 2010, *A&A* 513, A56
- 8) Wada K., Tanaka H., Suyama T., Kimura H., Yamamoto T., 2009, *ApJ* 702, 1490
- 9) Zsom A., Ormel C. W., Güttler C., Blum J., Dullemond C. P., 2010, *A&A*, 513, A57
- 10) Spitzer L., 1941, *ApJ* 93, 369
- 11) Umebayashi T., 1983, *Prog. Theor. Phys.* 69, 480
- 12) Sano T., Miyama S. M., Umebayashi T., Nakano T.,

2000, *ApJ* 543, 486

- 13) Okuzumi S., 2009, *ApJ* 698, 1122
- 14) Hayashi C., 1981, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 70, 35
- 15) Okuzumi S., Tanaka H., Takeuchi T., Sakagami M-a., 2011, *ApJ*, in press. (arXiv: 1009.3199)
- 16) Okuzumi S., Tanaka H., Sakagami M-a., 2009, *ApJ* 707, 1247
- 17) Okuzumi S., Tanaka H., Takeuchi T., Sakagami M-a., submitted (arXiv: 1009.3101)
- 18) Furlan E., et al., 2006, *ApJS* 165, 568
- 19) Dullemond C. P., Dominik C., 2005, *A&A* 434, 971

### Dust Charging in Protoplanetary Disks: Introducing Electrostatics to Planetesimal Formation Theories

Satoshi OKUZUMI

*Department of Physics, Nagoya University, Aichi 464-8602, Japan*

Abstract: Collisional dust growth is the first step of planet formation in protoplanetary disks. Dust grains in the disks should carry nonzero negative charges by capturing ionized gas particles, but its effect on their growth has not been considered. We have for the first time performed numerical simulations of dust growth taking into account electrostatic repulsion. We find that a “frozen zone,” where dust growth stalls, can exist at a few to 100 AU from the central star.