

# 《2008年度最優秀研究者受賞論文》

## つぶらな衝突

和田 浩二<sup>1</sup>

2009年10月7日受領, 2009年10月30日受理.

(要旨) 原始惑星系円盤におけるダスト(ミクロン以下の固体粒子が多数付着したアグリゲイトになっている)同士の衝突は、微惑星形成やその後の円盤進化を考える上で重要な素過程であるが、不明な点が多い。本稿では筆者らが行ってきたダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーション(「つぶらな衝突」とい「粒らの衝突」)によって明らかになりつつある、ダストの構造進化と成長・破壊過程について紹介する。とくにダストが直接合体成長できるかどうかに関心をあてて議論し、高速衝突でも成長可能であることを示す。このことは、ダストの直接衝突合体成長による微惑星形成の可能性を示唆するものである。

### 1. くつつくの?

財布からコインを二枚出す。一円玉でも十円玉でもなんでもいい。机に置いておはじきの要領で一方を他方につける。くつつくだろうか? 二枚のコインははじけておしまい、くつつく素振りすら感じられない。あるいは降り積もった雪を一握り手にとって、壁に向かって勢よく投げしてみる。雪玉の一部は壁にくつつくかもしれないが、大方はじけ散ってしまうことだろう。では、原始惑星系円盤におけるダスト同士を衝突させればどうだろう。くつつくだろうか?

近年確立されつつある惑星形成論によれば、ガスが豊富に存在する原始惑星系円盤内において、まずは $\mu\text{m}$ 以下のサイズのダスト粒子が付着成長していく(ダストアグリゲイトの形成)。やがて数 km サイズの微惑星が形成され、さらに微惑星が集積することで惑星が形成される、というシナリオが有力である。しかしながら、ダストから微惑星が形成される過程が明らかになっておらず、惑星形成論の大きな問題点となっている。一つには、コインのように「ダストは衝突によって合体成長できないのではないか(微惑星形成は可能なのか)?」という素朴な疑問が呈されよう。本稿はこの問いに答えようという試みである。

ダストからの微惑星形成過程には主に重力不安定説と直接合体成長説がある[1, 2]。重力不安定説では円盤赤道面に形成された高密度のダスト層から重力不安定によって微惑星が形成される。この場合には、ダスト同士は重力で束縛されるわけであるから、衝突してくつつくかどうかはあまり気にしなくてよい(とはいえ、赤道面に沈殿するためには衝突して成長する必要があるが)。しかしながら、必然的に生じるであろう乱流によってそのような高密度のダスト層形成は難しい。一方、直接合体成長においては、成長が遅ければダストはガス抵抗を受けて中心星に落下してしまうという成長のタイムスケール問題もあるが、そもそも衝突で合体成長できるのかということが問題である。たとえば、乱流を考えない林モデル円盤では、ダスト同士の衝突速度は 50 m/s にも達する[3, 4]。乱流の存在を考えれば、さらに大きな速度にもなり得るだろう。そのような速度で衝突した場合、アグリゲイトであるダストは木端微塵に破壊されて成長できないのではないかと疑問はもつともである。成長方程式を用いて微惑星形成を論じた研究では、破壊で成長が阻害される臨界速度が 30 m/s 以下だとすると、m以上のサイズのダスト(微惑星)の形成が困難であることが示唆されている[5]。

我々のグループでは、N体計算の手法でアグリゲイト同士の衝突の数値シミュレーションを行うことで、

1. 千葉工業大学 惑星探査研究センター  
wada@perc.it-chiba.ac.jp

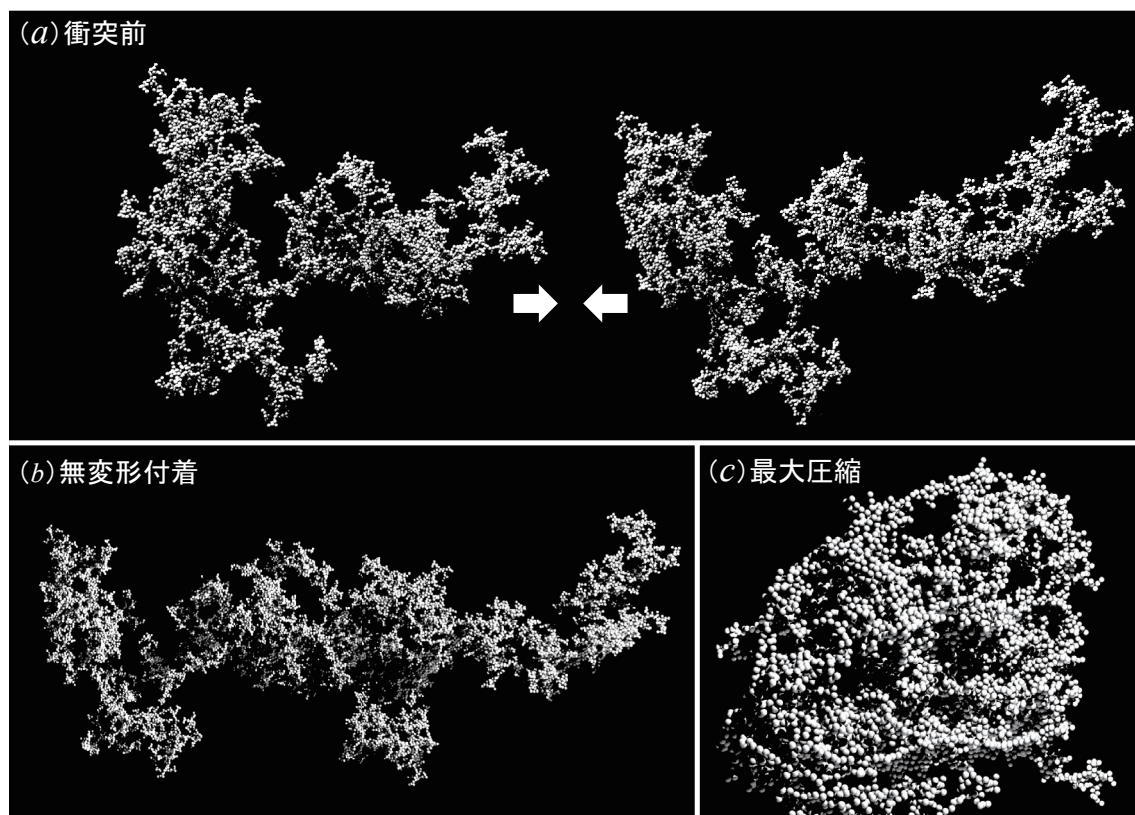


図1：8192個の氷粒子（粒子半径 $r_1 = 0.1 \mu\text{m}$ ）からなるBCCアグリゲイト同士の衝突例．(a)初期構造．(b)変形なしに付着（衝突速度 $u_{\text{col}} = 0.024 \text{ m/s}$ ，衝突エネルギー $E_{\text{imp}} = 0.01 E_{\text{roll}}$ ）．(c)最大圧縮（ $u_{\text{col}} = 13 \text{ m/s}$ ， $E_{\text{imp}} = 0.19 N_{\text{total}} E_{\text{roll}}$ ）．

衝突の結果生じるダストの構造進化（密度や断面積の進化）や成長・破壊過程を明らかにしつつある．以下ではダストが衝突合体成長できるかについてまとめてみたい．驚くべきことに， $50 \text{ m/s}$ （時速に直せば  $180 \text{ km/h}$ ）という高速衝突にあっても，ダストは成長し得ることが明らかになりつつある．

## 2. ダストの成長過程

### 2.1 はじまりは遅い衝突

まずは，ダストの成長過程の概要を見てみよう．

ダストを構成するのは $\mu\text{m}$ 以下のサイズの固体粒子（岩石や氷など）である．その固体粒子には表面張力（分子間力）が働くために，互いに付着することが可能となりアグリゲイトとなる．また衝突したダスト同士も，衝突速度が極めて小さい場合には付着することができ

る．ダスト成長の最初の段階では，ダストの運動は円盤ガスに強く影響を受けるため[3]，衝突の相対速度が小さい（ $< 1 \text{ mm/s}$ ）．そのため，同じサイズのダスト同士がその構造を保ったまま変形せずに付着成長していくことになる．このときの成長過程は，Ballistic Cluster-Cluster Aggregation，略してBCCAと呼ばれ，非常に空隙率が大きくフラクタル次元<sup>1</sup>がおよそ2以下の構造，いわゆるBCCアグリゲイトが形成される[6]．そのようなBCCアグリゲイトは成長に伴って運動エネルギーが増すため，やがては変形・圧縮され密な構造になり，衝突速度によっては破壊されてしまうだろう．このBCCアグリゲイトの付着・変形・圧縮過程は，構成粒子一つ一つの運動を計算するN体数値シミュレ

1. アグリゲイトのフラクタル次元は例えば次のように定義される．アグリゲイトの典型的サイズ $r_c$ と構成粒子数 $N$ との間に

$$N \propto r_c^d$$

の冪乗関係があるとき，アグリゲイトはフラクタル次元 $d$ のフラクタルであると定義される．通常のコンパクトな3次元物体はフラクタル次元も3で与えられる．

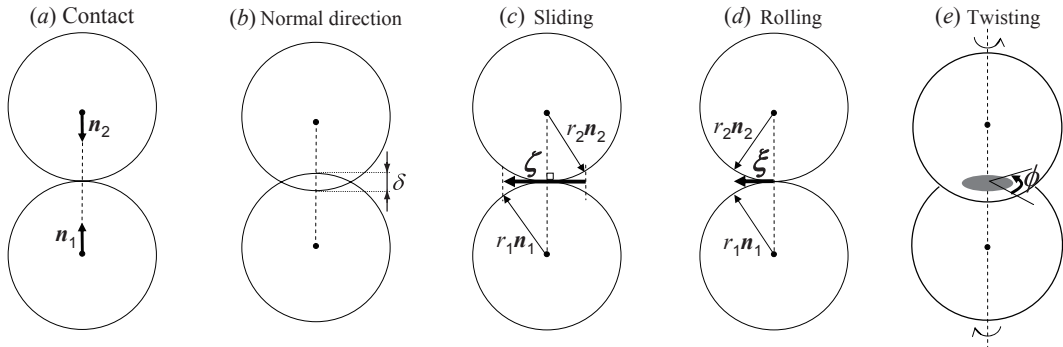


図2：接触粒子1と2の (a) 接触時、(b) 法線方向運動、(c) スライド運動、(d) 転がり運動、(e) 捩れ運動、の模式図。二粒子間の圧縮変位 $\delta$ は、図のように粒子間の重なる距離として与える。スライドと転がり運動(変位は各々 $\xi$ )は、最初の接触点方向を示す単位ベクトル $n_1, n_2$ の動きによって表現される。捩れ運動の変位角は $\phi$ 。

ーションによって詳細に調べられてきた[4, 7, 8, 9](図1参照)。用いた粒子間相互作用モデル等については後述するとして、以下のような結果が得られている。まず、BCCアグリゲイトの変形・圧縮に重要なのは、接触している粒子を表面上で一定角度(たとえば $90^\circ$ )転がすのに必要なエネルギー $E_{\text{roll}}$ であり、衝突エネルギー $E_{\text{imp}}$ が $E_{\text{roll}}$ 程度あればアグリゲイトの圧縮が可能となり、 $N_{\text{total}}E_{\text{roll}}$ 程度( $N_{\text{total}}$ は全粒子数)あれば最大限圧縮されることが示された。このことは、一接触点において有意に転がすことが出来れば圧縮が開始され、全接触点にて転がすことができるエネルギーがあれば最も圧縮されることを意味し、理解しやすい。また、これらの変型・圧縮基準は実験的にも確認されている[10]。さらに数値シミュレーションで明らかになったことは、圧縮されたアグリゲイトのフラクタル次元が2.5程度にしかならないということである[4, 9]。コンパクトな物体のフラクタル次元は3であり、それよりも明らかに小さいフラクタル次元にしかならないということは、ダストの密度は成長するにつれて低下することを意味し、衝突でダストを圧縮することは困難であることを示している。Suyama et al.[4]は原始惑星系円盤中での衝突速度を考慮して $10^{-4} \text{ g/cm}^3$ 以下という低密度(空気より軽い!)の微惑星が形成されることを示唆している。このことは、微惑星の名残であろうとされる彗星や小惑星が比較的低密度であることを説明するかもしれないが、空気より軽いようなものは当然観測されていない。微惑星形成にあたっては衝突以外の何らかの圧縮過程(たとえば円盤ガスによる静的圧縮など)が必要であろう。しかしながら、ダストが低密度のまま成

長するならば成長のタイムスケール問題が解決され微惑星形成が可能であることが指摘されており[11]、低密度で成長することの意義は大きい。

## 2.2 やがて高速衝突へ

話を圧縮されるダストに戻そう。ダストはひとたび圧縮が始されると断面積/質量比が小さくなり衝突速度が増し、それがまた圧縮を引き起こす。結果として、圧縮されたダストは、数10 m/sという高速衝突を経験するようになる。このような高速衝突ではダストの破壊は免れないだろう。これまでの数値シミュレーションでは、圧縮前のBCCアグリゲイトにおいて破壊基準が調べられている。ここでは接触している粒子ペアを引き離すのに必要なエネルギー $E_{\text{break}}$ が重要で、 $E_{\text{imp}} \geq 10 N_{\text{total}}E_{\text{break}}$ 、すなわち全接触点を引き離すのに必要なエネルギーの10倍程度以上の衝突エネルギーがあれば破壊が卓越し成長できずに終わる(カタストロフィック破壊)とされている。これは衝突速度にして $\sim 40 \text{ m/s}$ (半径 $0.1 \mu\text{m}$ の氷粒子からなるBCCアグリゲイトの場合)あるいは $\sim 4 \text{ m/s}$ (同様に岩石粒子の場合)に相当する。では、圧縮されたアグリゲイトではどうだろうか? 実験的には、半径 $0.75 \mu\text{m}$ の石英粒子からなるアグリゲイトに対して、衝突速度が $13 \text{ m/s}$ 以上でもなお合体成長することが示されている[12, 13]。しかし、アグリゲイトのサイズや衝突角度など様々なパラメータの影響を系統的に調べられてはいない。

最近我々のグループは、比較的小コンパクトな構造をもつBallistic Particle-Cluster(BPC)アグリゲイ

トを用いて衝突 $N$ 体数値シミュレーションを行った[14]. BPCアグリゲイトは粒子一つ一つを付着させて作られるため、アグリゲイトの付着によって作られるBCCアグリゲイトとは違い、フラクタル次元が3というコンパクトな構造になっている。原始惑星系円盤中で圧縮されるアグリゲイトは必ずしもBPCアグリゲイトの構造にはならないが、BPCアグリゲイト同士の衝突を調べることによって、高速衝突における圧縮されたダストの破壊あるいは成長過程に対して示唆が得られる。以下では、BPCアグリゲイトの衝突シミュレーションと得られた結果について詳しく述べることにしよう。

### 3. アグリゲイト衝突のシミュレーション手法

まずは衝突シミュレーション、とくに粒子間相互作用モデルについて簡単に紹介しておく。我々のシミュレーションにおいては、半径  $r_1 = 0.1 \mu\text{m}$  の石英または氷粒子からなるアグリゲイト同士の衝突を考えている。シミュレーション手法は Dominik and Tielens [7] と同様に、個々の粒子の運動を逐一計算していくものである。用いた粒子間相互作用モデルについて詳しくは Wada et al.[8]を参照してもらおうとして、ここではその概要を述べる。粒子は表面エネルギーの作用する弾性球とし、接触粒子間の法線方向相互作用はJKR理論[15]にもとづいて二粒子間の圧縮変位  $\delta = 2r_1 - |\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|$  の関数として与える ( $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  はそれぞれ接触粒子1,2の中心の位置ベクトル、図2参照)。また、接線方向に作用する抵抗力(またはトルク)はスライド、転がり、振れの各運動に対して図2に示される各変位  $\zeta, \xi, \phi$  の関数として与える。これらは弾性論[15]および Dominik and Tielens [16, 17]によって定式化されている。必要な物性値は、ヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、表面エネルギー  $\gamma$ 、物質密度  $\rho$  であり、氷の場合は  $E = 7 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.25$ 、 $\gamma = 100 \text{ mJ/m}^2$ 、 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  で与えている。

エネルギー散逸は、粒子の接触時と分離時にJKR理論によるポテンシャルの段差に応じて生じる[18]。また、接線方向の各変位には弾性限界変位  $\zeta_{\text{crit}}$ 、 $\xi_{\text{crit}}$ 、 $\phi_{\text{crit}}$  が想定され、変位が限界変位を超えると非弾性運動となってエネルギーが散逸する。スライドの限界変位  $\zeta_{\text{crit}}$  は Dominik and Tielens [7, 17]によって与

えられ、例えば半径  $0.1 \mu\text{m}$  の氷粒子では  $\zeta_{\text{crit}} \approx 4.3 \text{ \AA}$  となる。転がりの限界変位  $\xi_{\text{crit}}$  については、Dominik and Tielens [16]では理論的に  $\xi_{\text{crit}} = 2 \text{ \AA}$  で与えられているが、実験[19]によると半径  $0.95 \mu\text{m}$  の石英粒子に対しては  $\xi_{\text{crit}} = 30 \text{ \AA}$  と測定されており、よく分かっていない。我々のシミュレーションでは、 $\xi_{\text{crit}} = 8 \text{ \AA}$  とした。振れの限界変位は  $\phi_{\text{crit}}$  は Dominik and Tielens [7, 17]によって与えられ、 $\phi_{\text{crit}} = 1.1^\circ$  である。なお、最もエネルギー散逸が容易なのは転がり運動である。そのため、前節で述べたBCCアグリゲイトの変形・圧縮は接触粒子間の転がりによって担われ、 $E_{\text{roll}}$ を用いてスケーリングされたわけである。

次節で取り上げるシミュレーションにおいては、500から8000個の粒子からなる同じサイズ同士のBPCアグリゲイトを衝突させる。パラメータの数が多きことと計算機性能の限界から扱う粒子数は限られてしまうが、その限られた範囲内で粒子数依存性を見ることが出来る。粒子の物性としては、原始惑星系円盤中での主成分の一つである氷とする。また衝突方向(衝突パラメータ<sup>2)</sup>)も様々に振りオフセット(斜め)衝突の影響も考慮する。衝突は一般にはオフセット衝突になるはずであるから、その影響を考えることは必須である。そうして衝突速度を最大300 m/s程度まで振ってダストアグリゲイトの成長・破壊過程を調べることとする。

## 4. アグリゲイトの成長と破壊

### 4.1 シミュレーション例

BPCアグリゲイトの高速衝突シミュレーションの様子を見てみよう。図3には衝突速度が  $70 \text{ m/s}$  の場合における様々な衝突パラメータのもとでの衝突結

2. 衝突パラメータ  $b$  は、衝突のオフセット度合いを表すもので、アグリゲイトの重心間距離を衝突方向に垂直な方向へ射影した距離で与えられる。正面衝突なら  $b=0$  であり、 $b$  の値が増加するに従いオフセット度合いが大きい衝突となる。衝突する二つのアグリゲイトの典型的なサイズ  $r_{c,1}$ 、 $r_{c,2}$  を用いると衝突する場合の  $b$  の最大値  $b_{\text{max}} = r_{c,1} + r_{c,2}$  が与えられ、規格化された衝突パラメータ  $B$  は

$$B = b/b_{\text{max}}$$

で与えられる。また、衝突方向ごとに得られた測定量(たとえば後述する成長効率  $f$ ) を衝突方向で重みをつけて平均する場合には、

$$\bar{f} = \int_0^1 f dB^2$$

で求められる。

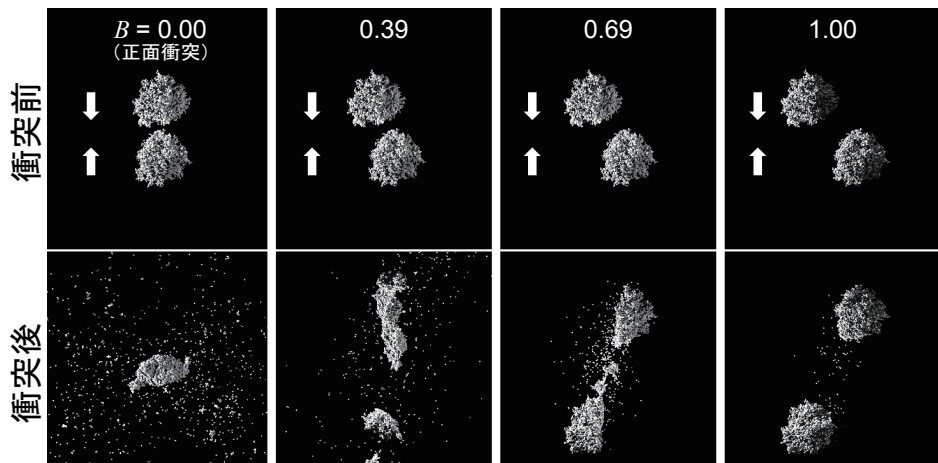


図3：8000個の氷粒子 ( $r_1=0.1 \mu\text{m}$ ) からなるBPCアグリゲイト同士の衝突例。正面衝突 (規格化衝突パラメータ  $B = 0.00$ ) からすれ違い衝突 ( $B=1.00$ ) まで4通りに対して、上段に衝突前の状態を、下段に衝突速度70 m/s ( $E_{\text{imp}} = 42N_{\text{total}}E_{\text{break}}$ ) で衝突した結果を示す。

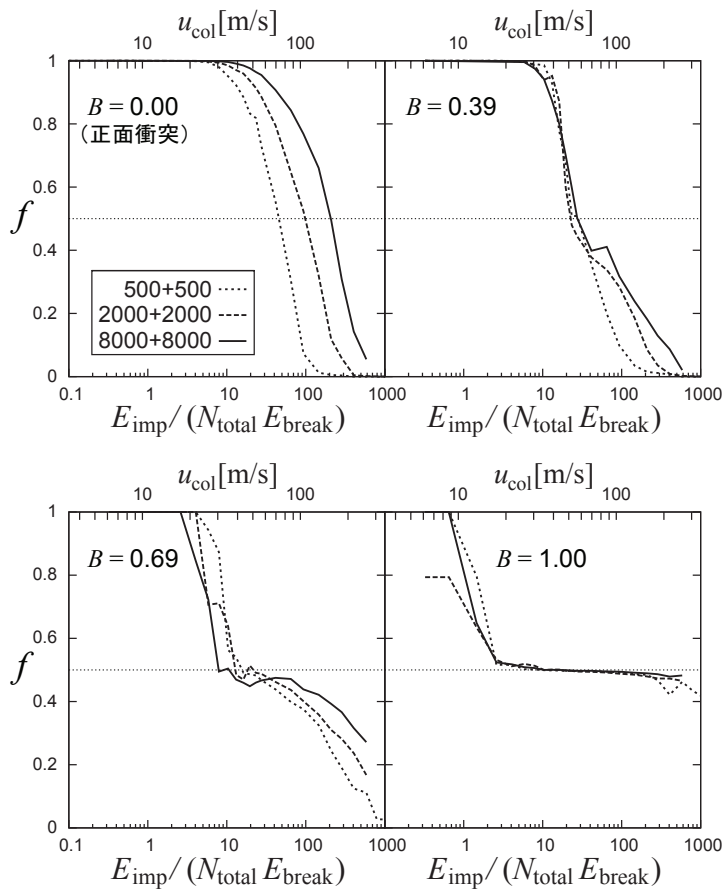


図4：氷粒子からなるBPCアグリゲイト同士の衝突における成長効率  $f = N_{\text{large}}/N_{\text{total}}$  と衝突エネルギー  $E_{\text{imp}}$  (横下軸,  $N_{\text{total}}E_{\text{break}}$  で規格化) あるいは衝突速度  $u_{\text{col}}$  (横上軸) の関係。4通りの衝突パラメータ  $B$  の場合のそれぞれについて、粒子数依存性 ( $N_{\text{total}} = 1000, 4000, 16000$ ) を示す。

果を示す。まず注目すべきことは、正面衝突の場合 ( $B=0.00$ )には高速衝突であるにもかかわらず大きなアグリゲイトが残るということである。破片は出るが合体成長できている。一方、オフセット衝突の場合 ( $B=0.39, 0.69$ )にはアグリゲイトは大きく引き裂かれ、合体成長するには厳しいことがうかがわれる。ただしあまりにオフセット度合いが大きいと ( $B=1.00$ )、衝突するアグリゲイトはほとんど相互作用せずすれ違って終わる。

アグリゲイトの破壊あるいは成長の程度は、衝突の結果生じた最大破片の構成粒子数  $N_{\text{large}}$  の全粒子数  $N_{\text{total}}$  に対する割合で評価できる。これを成長効率  $f = N_{\text{large}}/N_{\text{total}}$  と定義する。  $f=1$  ならアグリゲイトは破片を生じずに完全に合体したことを意味し、  $f>0.5$  ならばもとのアグリゲイトより大きくなったということで正味成長したことを意味する。より大きな速度で衝突すれば激しく破壊されるであろうから、成長効率  $f$  は衝突エネルギー（あるいは衝突速度）が増加するにつれて減少する。ちょうど  $f=0.5$  となる衝突速度はアグリゲイトが衝突によって成長できるかどうかの境となる臨界速度と考えることができる。成長効率  $f$  の衝突速度依存性および粒子数（アグリゲイトの質量）依存性をまずは正面衝突の場合について、ついでオフセット衝突を考慮した場合について見ていくことにしよう。

## 4.2 正面衝突

氷粒子からなるBPCアグリゲイト同士の正面衝突の場合について、成長効率  $f$  の変化を図4左上に示す。衝突エネルギーあるいは衝突速度が増加するにつれて  $f$  が減少することは当然として、注目すべきは粒子数依存性である。すなわち、粒子数が大きい（したがってサイズが大きい）ほど  $f$  はなかなか減少せず、臨界速度が大きくなる。粒子数8000のBPCアグリゲイト同士の衝突では臨界速度は 100 m/s を超えている。この傾向をそのまま外挿すれば、アグリゲイトは成長すればするほどより効率良く成長できることになる。

ではなぜ、このような粒子数依存性が見られるのだろうか？おそらくは、BPCアグリゲイトの比較的小コンパクトな構造が原因であると考えられる。高速で衝突すると、粒子間結合はばらばらにされてしまい、多くの小さな破片が生じるだろう。しかしコンパクトな構造のため、破片はアグリゲイトの表面から飛散する

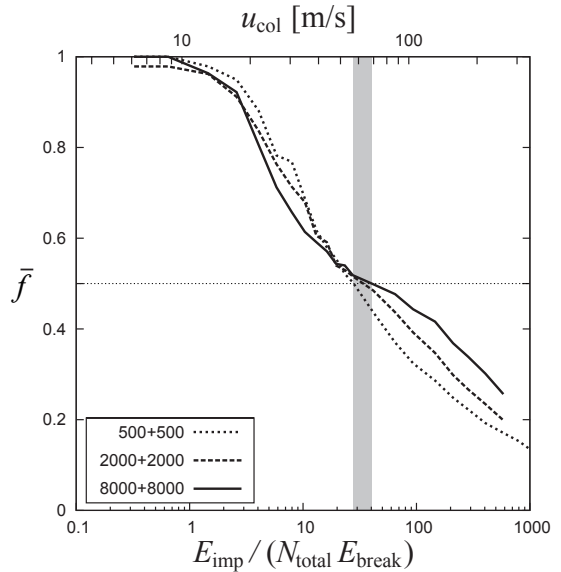


図5： 衝突方向で重みを付けて平均化した成長効率  $\bar{f}$  と衝突エネルギー（横下軸）あるいは衝突速度（横上軸）の関係。成長効率が0.5となる臨界速度は、粒子数を  $N_{\text{total}}=1000, 4000, 16000$  と変化させても差はほとんどみられず、影を付けた範囲内 (57-68m/s) に収まる。

しかなく、アグリゲイト内部の粒子は破片となって飛散することができない。内部に留まる粒子の割合は、アグリゲイトのサイズが大きいほど大きくなる。なぜならアグリゲイトのサイズが大きいほど表面を占める粒子の割合が少なくなるからである。結果として、衝突するアグリゲイトが大きいほど大きなアグリゲイトが残り、臨界速度が大きくなると考えられる。衝突時に発生する粒子間の付着・分離の回数を数えてみると、粒子数が大きいほど1粒子あたりの回数が増し、8000個の粒子からなるアグリゲイト同士の衝突ではそれが10回を優に超える。すなわち、アグリゲイト内部の粒子は飛散することができずに10回以上も分離・付着を繰り返す、そのことによってエネルギーを効率よく散逸していると考えられる。奇妙に聞こえるかもしれないが、「壊れることで成長できる」わけである。一方、より「すかすか」な構造であるBCCアグリゲイト同士の正面衝突では臨界速度に粒子数依存性は見られず、また一粒子あたりの付着・分離回数も数回程度にとどまることも示されている。これは「すかすか」な構造のため、いったん分離した破片粒子は容易に飛散し多数回の付着・分離を繰り返すことができなくなっているものと考えられる。このことも、BPCアグリゲイト

のコンパクトな構造が臨界速度を引き上げる原因であることを支持している。

コンパクトなアグリゲイト同士の衝突においてはアグリゲイトが成長するほど臨界速度が大きくなる傾向が認められるが、注意しなくてはならないのはそれが正面衝突においてである、という点である。正面衝突はまれにしかおこらず、一般にはオフセット(斜め)衝突となる。

### 4.3 オフセット衝突の影響

オフセット衝突になると、図4に示すように、正面衝突に比べてより小さい臨界速度になる傾向が見られる。また、正面衝突で見られた成長効率および臨界速度の顕著な粒子数依存性は見られなくなる。この原因は次のように考えることができる。正面衝突の際に論じたように、破片が効率よく飛散できれば粒子数依存性がなくなるだろう。成長効率は最大破片の粒子数を問題にしているため、大きな破片が衝突後効率よく逃げられるかが重要であり、オフセット衝突ではまさに衝突するアグリゲイトが大きく引き裂かれながらも容易に逃げられる(極端な場合にはすれ違って終わる)。したがって、オフセット衝突になると  $f$  に対する粒子数依存性がなくなると考えられる。なお、 $f=0.5$  付近で折れ曲がりが見られるのは、オフセット度合いが大きいために衝突しようとする二つのアグリゲイトがほとんど壊れずにすれ違ってしまうことを反映したものである。

このように衝突方向ごとに得られた成長効率を衝突方向(衝突パラメータ)で重みをつけて平均化したものが図5である。結果的に顕著な粒子数依存性は見られず、およそ 60 m/s という臨界速度が得られた。正面衝突に見られた粒子数依存性および大きな臨界速度が平均値にほとんど影響を及ぼしていないのは、確率的に正面衝突はまれでオフセット衝突が一般的であることを反映した結果である。

### 4.4 成長か破壊か

別途行ったBCCアグリゲイト同士の衝突シミュレーションによると、氷粒子からなるBCCアグリゲイトに対する臨界速度は、やはり粒子数に依存せずオフセット衝突を考慮してもおよそ 40 m/s となった。原始惑星系円盤中でのダストアグリゲイトの構造は、BCC

アグリゲイトとBCCアグリゲイトの間にあるだろうから、氷ダストアグリゲイトの臨界速度はおおよそ50 m/s と考えられる。また、結果が粒子数に依存しないことから、シミュレーションでは計算できないような mm や cm 以上のサイズのダストアグリゲイトに対しても 50 m/s という臨界速度が適用できることになる。これは氷ダストの結果であるが、原始惑星系円盤中で達成される最大衝突速度と同程度である。低温の円盤を考えれば最大衝突速度はより小さくなる[20]。したがって、少なくとも氷ダストは原始惑星系円盤中でも十分成長可能であるといえよう。

では岩石粒子からなるダストの場合にはどうなるだろうか。破壊される基準となる衝突エネルギーは接触粒子ペアを切り離すのに必要なエネルギー  $E_{\text{break}}$  でスケールされると考えられ(第2.2節)、岩石と氷の物性値の違い(岩石は氷に比べ、密度約3倍、表面エネルギー約1/4倍、ヤング率約8倍)を考慮すると、岩石粒子からなるアグリゲイトの臨界速度は氷粒子のそれより一桁程度小さくなる<sup>3</sup>。すなわち、氷ダストで50m/sという臨界速度は岩石ダストでは-5m/sとなる。これは原始惑星系円盤中の最大衝突速度より明らかに小さく、岩石ダストは微惑星にまで成長できないことになる。ただし、表面エネルギー  $\gamma$  やヤング率  $E$  が実際にどういう値をとるかは温度依存性など定かでないこともあり、場合によっては臨界速度が大きく違ってくる可能性がある。また、岩石粒子の表面を  $\gamma$  が大きく  $E$  が小さい物質が覆っていれば、その臨界速度は実効的には大きくなるだろう。その他にも、4.2節で示したように正面衝突あるいはそれに近い衝突であれば、確率は小さいかもしれないが臨界速度は大きくなり成長できる可能性がある。実際、実験で石英粒子からなるアグリゲイトが 13 m/s 以上と大きな臨界速度をもつのは正面衝突においてである[12,13]。あるいは、サイズの違うアグリゲイト同士の衝突が合体成長には有効かもしれない。サイズ比のついたアグリゲイトの衝突では、多少オフセットになろうとも正面衝突的になり、臨界速度の上昇が予想されるためである。原始惑星系円盤においてもサイズ比のついた衝突は頻繁に生

3. 表面エネルギー  $\gamma$ 、ヤング率  $E$ 、粒子半径  $R$  を用いると

$$E_{\text{break}} \propto \gamma^{5/3} E^{-2/3} R^{1/3}$$

とあらわされ、さらに物質密度  $\rho$  を用いると、臨界速度  $u_{\text{crit}}$  は

$$u_{\text{crit}} \propto \gamma^{5/6} E^{-1/2} R^{-5/6} \rho^{-1/2}$$

と与えられる。

じるはずである。これまで我々の衝突シミュレーションでは同じサイズのアグリゲイト同士の衝突を扱ってきたが、今後はサイズ比のついたアグリゲイト衝突のシミュレーションを行う必要がある。

## 5. 跳ね返る？

前節において少なくとも氷ダストの合体成長が可能であることが示されたが、実はここまでで言及していない厄介な問題が存在する。それが、アグリゲイトの「跳ね返り問題」である。幾つかの衝突実験において、アグリゲイトが付着せず跳ね返ってしまうことが報告されている。たとえば、半径  $0.75\ \mu\text{m}$  の石英粒子からなる低空隙率のアグリゲイト同士を  $1\ \text{m/s}$  以下の速度で衝突させると、変形もせず跳ね返る<sup>4</sup>[21]。跳ね返りはアグリゲイトの合体成長を阻害し、ひいては微惑星形成を不可能としてしまう[21,22]ため、看過できない現象である。一方、これまで我々が行ってきた衝突シミュレーションではそのような跳ね返りは見られない。もちろん、シミュレーションにおいて粒子間相互作用をはじめとしてモデル化が不十分であるという可能性は否定できない。しかしながら、アグリゲイトの圧縮・破壊条件に関してはシミュレーションは実験と調和的であり、一概にモデルに不備があるとは言いがたい。実験とシミュレーションの違いは何に起因しているのだろうか？

アグリゲイトが跳ね返るためには、衝突時にエネルギーが十分散逸されずに残り、運動エネルギーへと変換される必要がある。つまり跳ね返りにはエネルギー散逸を抑える仕組みが必要となる。アグリゲイトの衝突においては、粒子間の転がりやスライドなど粒子がある程度自由に動くことによってエネルギーが散逸される。そこで、一つの粒子に多くの粒子が付着していれば粒子が自由に動けずエネルギー散逸が不十分となり、アグリゲイトが跳ね返るのではないか、という仮説が考えられる。一つの粒子に付着している粒子の数を「配位数」と呼ぶ。配位数が十分多ければ極めて強固な構造となり、ちょうどコイン同士が跳ね返るように跳ね返るだろう。そこで我々は、様々な配位数をもつアグリゲイトの衝突シミュレーションを行い跳ね返るかどうかを確認することで、跳ね返るのに必要な配位数、すなわち跳ね返る条件、を明らかにしようと試

みている。

アグリゲイトにおいて最大の配位数は最密充填構造における12であり、最小はBPC構造やBCA構造の2である。任意の配位数をもつアグリゲイトを用意することは難しいため、最密充填構造のアグリゲイトから、粒子をランダムに差し引いて望みの配位数をもつアグリゲイトを作る。こうして作られたアグリゲイトの衝突シミュレーションを行うことで、アグリゲイトが跳ね返るかどうかの配位数依存性を明らかにすることが可能となる。現在のところ、予備的なシミュレーションにおいて、配位数が6以上のアグリゲイトでは多くの場合跳ね返り、配位数が6を下回ると跳ね返らず付着するという結果が得られつつある。6という配位数からは、一つの粒子が3軸ともしっかり抑え込まれ自由に動けずエネルギーを散逸できない状態であることが、容易に想像される<sup>5</sup>。前節で述べたBPCアグリゲイトやBCAアグリゲイトの衝突シミュレーションにおいては、形成されるアグリゲイトの配位数が4を超えることはないという結果が得られている。したがって、上述の配位数による跳ね返り条件が正しいとすると、ダストは跳ね返ることなく合体成長が可能と言えよう。ただし、実験で扱われているアグリゲイトは、その作成工程がBPCアグリゲイトと類似したものであることから配位数が2程度であると推測されており、単純に考えれば実験において跳ね返る理由は依然として謎のままである。衝突する際のアグリゲイトの表面状態が重要なかもしれないが、今後さらに検討が必要である。

## 6. まとめと今後の課題

原始惑星系円盤中での微惑星形成を論じるためには、ダストアグリゲイトの構造進化・成長過程を明らかにすることが重要である。これまで我々のグループが行ってきた、アグリゲイトの衝突数値シミュレーションから得られた重要な結果をまとめると以下の通りである。

- もともとフラクタル次元が2以下のふわふわなダ

4. ただし、あまりに小さな衝突速度では付着する。

5. この観点からすると、ぶつかるコインが跳ね返るのは、「コインを構成する粒子の配位数が6以上のため、破壊が生じない程度の低速衝突ではエネルギー散逸が困難であるから」と言えよう。実際、金属原子の配置は最密充填構造である。



スタグリゲイトは衝突によって圧縮されるが、そのフラクタル次元は2.5程度にとどまる。すなわち衝突による圧縮には限界があり、結果として低密度のままダストは成長する。

- ある程度圧縮されたダスタグリゲイトは、成長途上で高速衝突を経験すると予想される。そのようなグリゲイトに対し、破壊が卓越し成長が阻害される衝突速度すなわち臨界速度を調べた結果、氷グリゲイトの場合サイズによらず $\sim 50$  m/sであった。これは原始惑星系円盤中で達成される最大衝突速度と同程度かそれ以上である。したがって少なくとも氷ダストは衝突合体成長が可能であり、微惑星形成に至ることが示唆される。
- ダストは衝突しても跳ね返ってしまい、合体成長が妨げられるかもしれない。ただし、予備的なシミュレーションから粒子の配位数による跳ね返り条件が提案され、その限りにおいては、ダストは跳ね返ることなく合体成長できることが示唆されている。

いずれも、ダストの直接合体成長により微惑星形成が可能であることを示唆するものである。ただし、岩石ダストについては、臨界速度が小さくそのままでは成長できない。岩石ダストの合体成長には、サイズ比のついた衝突が大きな役割を担うであろうと考えられるため、サイズ比のついたグリゲイトの衝突による影響を調べるのが今後の重要な課題である。また、グリゲイトの衝突実験で報告されている跳ね返り問題を解決することも大きな課題であろう。加えて、跳ね返り実験においてはグリゲイトに亀裂が入って「割れる」という現象も報告されているが、数値シミュレーションでは割れる現象は確かめられていない。このような実験と数値シミュレーションのギャップを解決することも重要である。転がりやスライドなど粒子間相互作用モデルを見直す必要があるかもしれない。

これまでのシミュレーションでは、粒子間が焼結したりグリゲイトが帯電した時の効果やガス圧等による静的圧縮の効果などが考慮されていない。例えば、ダストが帯電することは原始惑星系円盤中では十分考えられ、そのことによってダストの成長凍結や暴走成長といったことが起こり得ると指摘されている[23]。また、粒子にサイズ分布がある場合には、粒子間結合

の強い箇所・弱い箇所が存在することで結果が変わる可能性もある。このような様々な効果の影響を検証していくことも重要である。

本稿では取り上げなかったが、グリゲイトの高速衝突によって生じる破片のサイズ分布や生成率なども、円盤の進化や光学的性質などに影響を及ぼすであろう。また、彗星や小惑星の表層進化といった観点からも、グリゲイトの衝突シミュレーションは貢献できる考えられる。今後とも「つぶらな衝突」に精力的に取り組み興味深い結果を提示していきたいと思う。読者諸氏のつぶらな瞳で堪能していただければ幸いである。

## 謝辞

本稿は日本惑星科学会2008年度最優秀研究者賞受賞記念論文として執筆しました。内容の殆どは北海道大学低温科学研究所在籍中の研究成果であり、田中秀和、陶山徹、木村宏、山本哲生の各氏との共同研究から生まれたものです。筆者はこれまで「衝突」というキーワードを中心に研究活動を行ってきており、そのなかで学生時代の指導教官でもある松井孝典先生や衝突研究会のみなさんをはじめ多くの方々との議論を通じて学んだ成果でもあります。心より御礼申し上げます。また、城野信一氏には有益な査読意見を頂きました。感謝申し上げます。千葉工業大学惑星探査研究センター Contribution No. 3.

## 参考文献

- [1] Goldreich, P. and Ward, W. R., 1973, *Astrophys. J.* 183, 1051.
- [2] Weidenschilling, S. J. and Cuzzi, J. N., 1993, in *Protostars and Planets III*, 1031.
- [3] Adachi, I. et al., 1976, *Prog. Theor. Phys.* 56, 1756. 12
- [4] Suyama, T. et al., 2008, *Astrophys. J.* 684, 1310.
- [5] Brauer, F. et al., 2008, *Astron. Astrophys.* 480, 859.
- [6] Mukai, T. et al., 1992, *Astron. Astrophys.* 262, 315.
- [7] Dominik, C. and Tielens, A. G. G. M., 1997, *Astrophys. J.* 480, 647.
- [8] Wada, K. et al., 2007, *Astrophys. J.* 661, 320.
- [9] Wada, K. et al., 2008, *Astrophys. J.* 677, 1296.
- [10] Blum, J. and Wurm, G., 2000, *Icarus* 143, 138.

- [11] 田中秀和ほか, 2007, 低温科学66, 47.
- [12] Wurm, G. et al., 2005, *Icarus*, 178, 253.
- [13] Teiser, J. and Wurm, G., 2009, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 393, 1584.
- [14] Wada, K. et al., 2009, *Astrophys. J.* 702, 1490.
- [15] Johnson, K. L., 1987, *Contact Mechanics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- [16] Dominik, C. and Tielens, A. G. G. M., 1995, *Phil. Mag.* A 72, 783.
- [17] Dominik, C. and Tielens, A. G. G. M., 1996, *Phil. Mag.* A 73, 1279.
- [18] Chokshi, A. et al., 1993, *Astrophys. J.* 407, 806.
- [19] Heim, L.-O. et al., 1999, *Phys. Rev. Lett.* 83, 3328.
- [20] 陶山徹ほか, 2008, *遊星人*117, 177.
- [21] Blum, J. and Wurm, G., 2008, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 46, 21.
- [22] Zsom, A. et al., 2009, submitted to *Astron. Astrophys.*
- [23] Okuzumi, S., 2009, *Astrophys. J.* 698, 1122.