

塵衝突シミュレーション

和田浩二、田中秀和、陶山徹、木村宏、山本哲生

低温基礎科学部門 雪氷物性・惑星科学グループ

1 背景

近年確立されつつある惑星形成論によれば、まず原始惑星系円盤において、沢山の粒子（一つ一つは μm 以下のサイズ）が凝集した塵（ダストまたはダストアグリゲイトと呼ぶ）が、衝突や重力不安定によって付着成長し、やがて数 km サイズの微惑星が形成され、さらに微惑星が合体成長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。このシナリオは多くの研究に裏付けされたものではあるが、実はダストから微惑星が形成される過程には不明な点が多く、惑星形成論の大きな問題点となっている。ダストが微惑星にまで成長する過程では、その密度や断面積といったダストの構造が、円盤中でのガス抵抗や衝突速度などに影響し、ダストが付着成長できるかどうかを左右する。したがって、微惑星形成を論じる上で、ダストアグリゲイト同士が衝突した結果どういう構造となるのか、その構造進化過程を明らかにすることが重要となっている。

これまで、ダストアグリゲイトの構造進化を明らかにすべく、アグリゲイト同士の衝突の数値シミュレーションが行われてきた [1]。そのシミュレーションは粒子間相互作用を考慮しながらアグリゲイトを構成する粒子一つ一つの運動を計算するものであり、計算コストが非常に大きい。そのため、先行研究 [1] では高々40個の粒子からなるアグリゲイトで2次元衝突を扱ったものに過ぎず、3次元多数の粒子からなるアグリゲイトの構造を論じるうえでは不十分であった。そこで我々のグループでは、最近の計算機能力の向上を踏まえて、3次元・多数の粒子からなるアグリゲイト同士の衝突を数値シミュレーションすることで、ダストアグリゲイトの構造進化モデルを確立することを目指している。ここでは、研究の第一段階として、また先行研究 [1] との比較という観点から、2次元アグリゲイトの正面衝突のシミュレーションにおいて得られた結果を報告する。

2 数値シミュレーション方法

我々が行ったダストアグリゲイト衝突のシミュレーションは、先行研究 [1] 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。その数値計算コードにおいては、粒子間相互作用、すなわち粒子間の圧縮引張・滑り・転がり・擦れの各自由度に対して働く力、を如何に記述するかが重要となる。ダスト粒子は小さいために表面張力が効く。そこで表面張力が作用する弾性球に対する粒子間相互作用モデル [2, 3, 4] を基に、我々はエネルギー保存の極めて良い数値計算コードを開発した。

数 10 K といった低温環境の原始惑星系円盤においては、ダスト粒子は岩石成分のほか、氷も主成分である。したがって、衝突の初期条件として SiO_2 または氷からなる半径

0.1 μm の粒子を最大 2040 個付着させた 2 次元のアグリゲイトをあらかじめ用意する。それらアグリゲイトは原始惑星系円盤内の初期ダスト構造を反映した極めて低密度 (Ballistic Cluster-Cluster Aggregates: BCCA) のものとした。アグリゲイト同士の衝突は正面衝突とし、衝突速度は SiO_2 アグリゲイトの場合には 0.038 m/s から 5.7 m/s、氷アグリゲイトの場合には 0.38 m/s から 57 m/s まで変えてシミュレーションを行った。

とくに、衝突したアグリゲイトの構造がその衝突エネルギーによってどれだけ圧縮・破壊されるか、に注目し、その構造変化の物性依存性や粒子数依存性を明らかにする。

3 結果

図 1 は、シミュレーション結果の代表的な例を示したものである。衝突エネルギーが小さいうちは、アグリゲイトはほとんど変形せずに「ふわふわ」なままの構造を維持するが、衝突エネルギーが大きくなるにつれ変形・圧縮され、やがて破壊されてしまう。

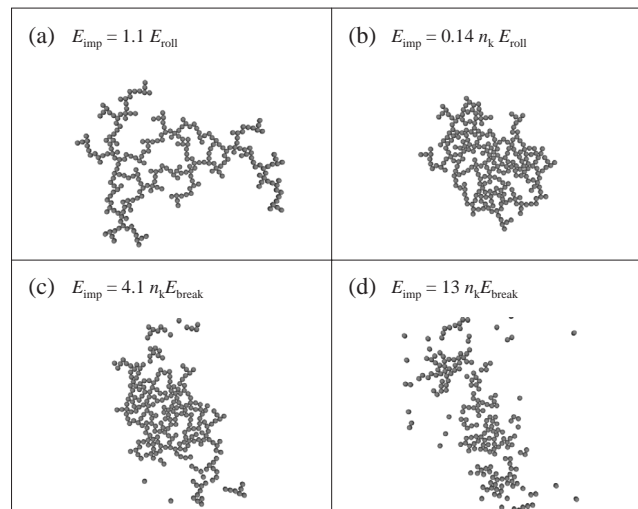


図 1: 128 個の SiO_2 粒子からなるアグリゲイト同士の 2 次元正面衝突シミュレーション結果の例。衝突エネルギー E_{imp} が大きくなるにつれて、(a) 変形開始、(b) 最大圧縮、(c) 一部が剥がれる、(d) カタストロフィックな破壊、といった違いが見られる。 E_{roll} は粒子を転がすのに必要なエネルギー、 E_{break} は粒子を引き剥がすのに必要なエネルギー、 n_k は衝突前の接触点数をあらわす。

3.1 圧縮過程、破壊過程

アグリゲイトの圧縮度合いは、そのサイズ（ここではアグリゲイトの回転半径）や接触点数の変化によって定量的に評価出来る。多数のシミュレーションの結果、それらの変化の仕方は物性に依らず、さらにある程度粒子数が多いと構成粒子数に依らず、衝突エネルギーと全接触点において粒子をある程度転がすのに必要なエネルギーの比 $E_{\text{imp}}/(n_k E_{\text{roll}})$ のみで決まることが示された（図 2）。また、図 2 はこの比の値がおおよそ 1 の時に最も圧縮されることを示しており、先行研究 [1] の結果と調和的である。

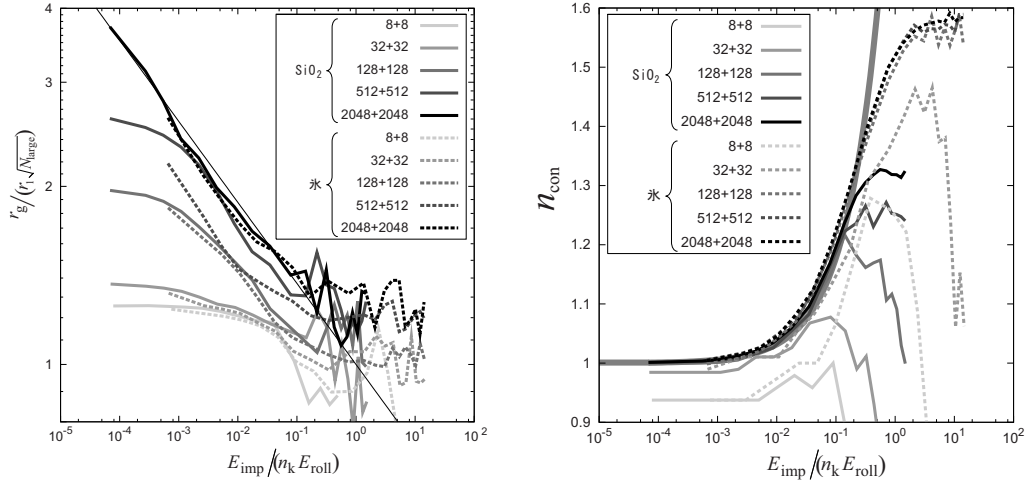


図 2: (左) アグリゲイトの回転半径 r_g ($r_1 \sqrt{N_{\text{large}}}$ で規格化: r_1 は粒子一つの半径, N_{large} は最大クラスターの構成粒子数) を衝突エネルギー E_{imp} ($n_k E_{\text{roll}}$ で規格化) の関数としてプロットしたもの。実線が SiO_2 、破線が氷の結果で濃淡は構成粒子数の違いを示す。細線はモデルから得られた関係式: $r_g / (r_1 \sqrt{N_{\text{large}}}) = [E_{\text{imp}} / (n_k E_{\text{roll}})]^{-0.137}$ 。(右) 最大クラスターにおける 1 粒子当たりの接触点数 n_{con} を衝突エネルギー $E_{\text{imp}} / (n_k E_{\text{roll}})$ の関数としてプロットしたもの。薄い太線は得られた経験式: $n_{\text{con}} = 1 + [E_{\text{imp}} / (n_k E_{\text{roll}})]^{3/4}$ 。

ただし、物性によってどこまでコンパクトに圧縮できるかに差が見られる（氷のアグリゲイトのほうが SiO_2 のアグリゲイトに比べよりコンパクトになるなど）が、それも唯一つのパラメーター（粒子を転がすのに必要なエネルギーと引き剥がすのに必要なエネルギーの比 $E_{\text{roll}}/E_{\text{break}}$ ）のみで決まることが示された。このようにアグリゲイトの変形・圧縮が少数のパラメーターでスケールされることから、ダストの構造進化モデルの構築が期待できる。

アグリゲイトの破壊に関しても、先行研究 [1] と調和的な結果が得られた。即ち衝突エネルギーと全接触点において粒子を引き剥がすのに必要なエネルギーの比 $E_{\text{imp}} / (n_k E_{\text{break}})$ がおよそ 10 以上になるとアグリゲイトの大きさが半分以下になるというものである（図 3）。ただし、アグリゲイトの破壊に関しては、大きな（構成粒子数が多い）アグリゲイトほど破壊されにくい、という構成粒子数依存性が見られる結果も得られつつある。これが本当ならば、ダストが大きくなるにつれ破壊が生じにくくなりより効率的に成長できることを意味し、ダストの成長、ひいては微惑星形成過程に対して重要な示唆を与えることになる。

4 まとめと課題

本研究では、ダストアグリゲイトが衝突によって圧縮・破壊される過程を理解するために、2次元のアグリゲイト同士の衝突シミュレーションを行った。その結果、圧縮・破壊の規準はおおよそ先行研究 [1] と調和的であった。さらに圧縮過程はアグリゲイトの回転半径および接触点数によって評価することでそのスケール則が得られる見通しがたっ

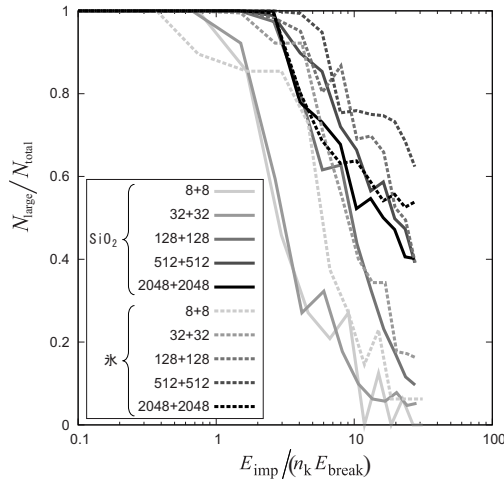


図 3: 最大クラスターの構成粒子数と全粒子数の比 $N_{\text{large}}/N_{\text{total}}$ を衝突エネルギー E_{imp} ($n_k E_{\text{break}}$ で規格化) の関数としてプロットしたもの。

た。ただし、ここでの結果はあくまで2次元アグリゲイトの正面衝突によって得られたものである。一般的には3次元で、衝突方向がずれたオフセット衝突になると考えられ、その影響も評価する必要がある。また、実際に何度も衝突を繰り返した果てにどう構造が変化(進化)していくのか、も当然扱わなければならない問題である。今後はそのようなシミュレーションも行うことで、より一般的なダストアグリゲイトの構造進化モデルが得られると期待される。

粒子数が多くなると計算にかかる時間が増すのに加え、衝突速度や物性など様々なパラメーターを振ったシミュレーションを行う必要がある。今回の計算は多数の計算機を用いてパラメータスタディを行う、というやりかたであったが、今後は計算の並列化にも取り組むことでより効率よくシミュレーションを行っていきたい。

謝辞

本研究では計算機の構築等に関して低温研技術部の千貝健博士に大変お世話になりました。感謝いたします。

参考文献

- [1] Dominik, C., & Tielens, A. G. G. M. 1997, *Astrophys. J.*, 480, 647
- [2] Johnson, K. L., Kendall, K., & Roberts, A. D. 1971, *Proc. R. Soc. London A*, 324, 301
- [3] Dominik, C., & Tielens, A. G. G. M. 1995, *Phil. Mag. A*, 72, 783
- [4] Dominik, C., & Tielens, A. G. G. M. 1996, *Phil. Mag. A*, 73, 1279