

圧縮ダストアグリゲイトの衝突シミュレーション： 付着・跳ね返り条件の推定に向けて

○大城榛音¹, 辰馬未沙子², 奥住聡¹, 田中秀和³

¹ 東京工業大学, ² 理化学研究所, ³ 東北大学

惑星形成の第一歩はサブミクロンサイズの微粒子の衝突合体によるダストアグリゲイトの形成である。近年の原始惑星系円盤のミリ波偏光観測では、充填率が0.1以上の比較的コンパクトなダストアグリゲイトの存在が示唆されている (e.g., Tazaki et al. 2019)。このような高密度なダストアグリゲイト同士が衝突すると、付着や破壊だけではなく、跳ね返りが起こることが知られている (e.g., Güttler et al. 2010)。跳ね返りは原始惑星系円盤における固体成長に影響を与える (e.g., Dominik and Dullumond 2024) もの、その条件については未だ議論の中にある。

ダストアグリゲイトの跳ね返りについては、室内実験と数値シミュレーションの両方から研究されているが、統一的な理解はされていない。室内実験では、大きなアグリゲイトほど低速度での衝突で跳ね返ることが示されている (e.g., Güttler et al. 2010; Kothe et al. 2013)。特に Kothe et al. (2013) は、跳ね返るために必要な質量が衝突速度の $4/3$ 乗に比例していることを示した。一方、数値シミュレーションでは、粒子数を増やした欠陥最密充填球 (CPE 球) を用いた衝突シミュレーションを行い、より大きなアグリゲイトほど跳ね返りやすいことが示されたが、明確な衝突速度依存性は確認されなかった (Arakawa et al. 2023)。しかし、CPE 球は現実のダストアグリゲイトの構造を模擬しているとは限らず、実際、CPE 球は最密充填球の構造を反映し、接触点数の高い領域を至る所に持つ。

そこで我々は、圧縮したアグリゲイトによる衝突シミュレーションを行い、跳ね返り条件の速度依存性を検証した。円盤におけるダスト成長を想定し、空隙率の高いアグリゲイト (BCCA) を等方圧縮した圧縮 BCCA を用いた。アグリゲイトの構成粒子は $0.1 \mu\text{m}$ の氷球で表面力を持った弾性球として扱い、構成粒子に対する運動方程式を解いた (Wada et al. 2007)。アグリゲイトの充填率、質量、衝突速度をパラメータとし、成長効率を求めた。

その結果、アグリゲイトの衝突結果はアグリゲイトの質量と衝突速度の両方に依存することがわかった。シミュレーションの結果を図1に示す。充填率が0.4の結果を表す一番右のパネルを見ると、跳ね返りが起こるためには一定の質量 ($\sim 10^{-9} \text{g}$) が必要であり、その質量を超えると跳ね返りに必要な衝突速度は低下する。この依存性は衝突速度が 10ms^{-1} の範囲で Kothe et al. (2013) の結果と整合的であった。また、衝突速度を固定したときの跳ね返りに必要なアグリゲイト質量は充填率に強く依存していた。我々は、この強い充填率依存性は高密度アグリゲイトの圧縮強度 (Tatsuuma et al. 2023) に由来するものであると考えている。

さらに、我々はいくつかのシミュレーションに対して、エネルギーの時間進化を解析した (図2)。跳ね返りは初期に有している運動エネルギーが弾性エネルギーとして溜まり、それが再び運動エネルギーへと変換することで起こると考えられる。解析の結果、衝突結果に依存せず、運動エネルギーの約90%が圧縮時の変形によって散逸することがわかった。残った運動エネルギーは弾性エネルギーとして蓄えられ、効率よく運動エネルギーに再変換されるが、その70%以上は引っ張り時の変形によって散逸する。その結果、跳ね返った例であっても、最終的にアグリゲイトが有する運動エネルギーは初期運動エネルギーの1%程度であった。

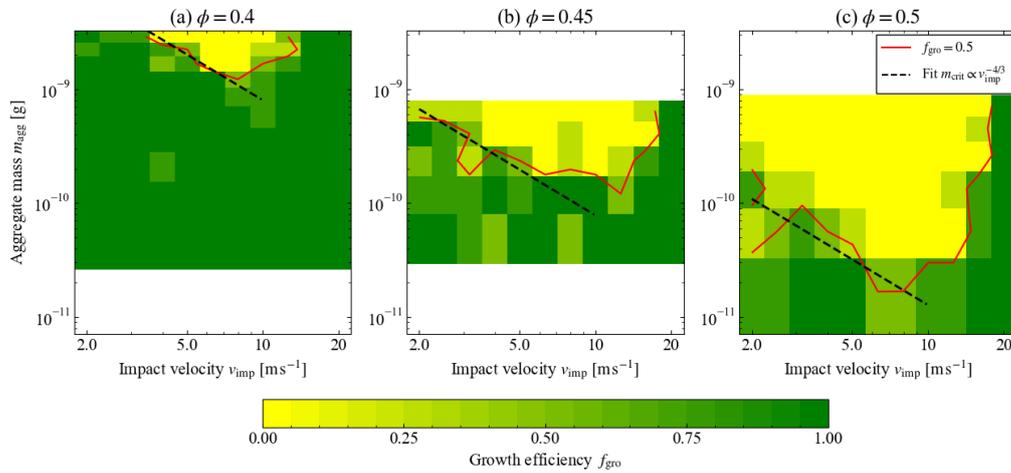


図 1: 成長効率 f_{gro} の衝突速度 v_{imp} 、アグリゲイト質量 m_{agg} 、充填率 ϕ 依存性。赤線は付着と跳ね返りの境界である $f_{gro} = 0.5$ の等高線を、破線は等高線に対する $-4/3$ 乗のフィッティングを表す。

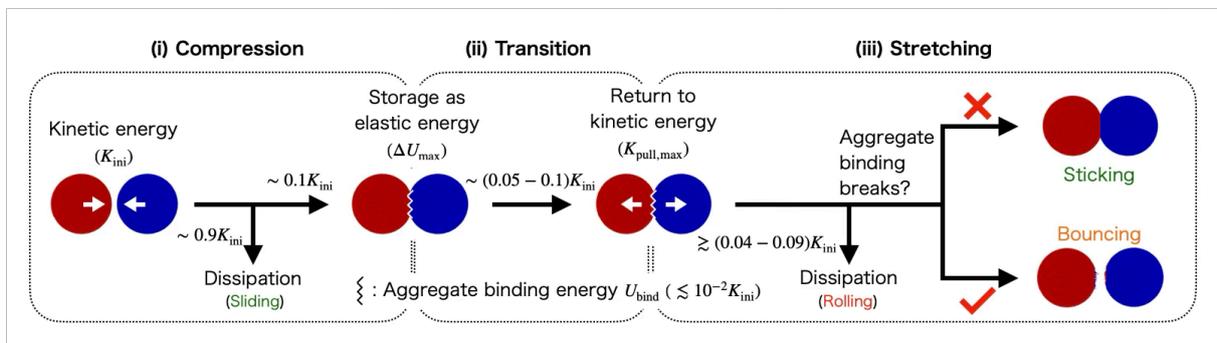


図 2: 破壊を起こさないものの変形するような衝突速度でアグリゲイトが衝突した時のエネルギーの時間推移。初期に有した運動エネルギー K_{ini} のうち、圧縮中に約 90% が散逸する。その後、溜まった弾性エネルギー ΔU_{max} は効率よく運動エネルギー $K_{pull,max}$ に変換されるが、その後の引っ張り過程で 70% 以上が散逸する。このとき、アグリゲイト間の結合エネルギー U_{bind} を壊すエネルギーを有していれば、跳ね返りが起こると考えられる。