

「氷」粒子の付着特性について

Sota Arakawa (NAOJ)、Sebastian Krijt (University of Exeter)

ダスト粒子の衝突合体成長は惑星形成の第一歩である。ゆえに、その限界付着速度を実験的および理論的に調べることは惑星科学において極めて重要である。特に、ダスト粒子が合体成長する舞台である原始惑星系円盤において、スノーラインより外側の低温領域ではダスト粒子は氷マントルに覆われていると考えられ、限界付着速度は氷マントルの物性によって決まると考えられる。また、原始惑星系円盤には H₂O 以外にも「氷」を形成しうる揮発性物質がいくつも存在する (CO、CO₂、CH₄ など)。これらの分子についても各々の凝縮温度に対応して“スノーライン”が存在し、その外側では「氷」ダスト粒子として存在することが期待される。つまり、水およびその他の分子の「氷」ダスト粒子の付着特性を明らかにすることが原始惑星系円盤の進化や惑星形成を理解するために不可欠であるといえる。

CO₂ 氷粒子の限界付着速度は Musiolik et al. (2016a) によって実験的に調べられている。Musiolik らは 80 K の低温環境で CO₂ 氷粒子の衝突実験を行い、半径 60 μm 程度の CO₂ 氷粒子の限界付着速度が $(0.04 \pm 0.02) \text{ m s}^{-1}$ であると求めた。また、Musiolik et al. (2016b) では同様の実験を H₂O 氷粒子について行い、80 K において半径 90 μm の H₂O 氷粒子の限界付着速度が 0.73 m s^{-1} 程度であると報告している。つまり、H₂O 氷粒子は同程度の半径を持つ CO₂ 氷粒子と比較して、ダスト粒子の限界付着速度が 1 桁程度大きいことが実験からわかっている。

では、この限界付着速度の違いは何に由来するのだろうか？まず我々は、表面エネルギーに由来する付着力を考慮した弾性球の接触理論 (JKR 理論) に基づき CO₂ 氷と H₂O 氷の表面エネルギー、ヤング率、ポアソン比、密度から限界付着速度を計算した。すると、CO₂ 氷粒子については Musiolik らの実験で得られた限界付着速度は JKR 理論から予想される値とほぼ一致するが、H₂O 氷粒子については実験で得られた限界付着速度は JKR 理論から得られる値よりも 1 桁以上大きいことが明らかになった。ミクロンサイズの H₂O 氷粒子の限界付着速度が JKR 理論から予想される値よりも大きくなることは Gundlach & Blum (2015) の実験でも指摘されている。つまり、H₂O 氷粒子の衝突付着には、表面エネルギー由来の付着力だけでなく追加のエネルギー散逸機構が存在する必要があると考えられる。

我々はこのエネルギー散逸が粘性的なものであると考え、H₂O 氷および CO₂ 氷粒子について粘性的な散逸を考慮した弾性球の接触モデル (Krijt et al. 2013) を用い、Musiolik らの実験結果を再解釈した。Arakawa & Krijt (2021) では実験と数値計算を比較し、粘性散逸の強さを決める係数を決定した。さらに、2 つの直径 1 μm 程度の粒子の衝突について、CO₂ 氷粒子の場合には限界付着速度は 1 m s^{-1} 程度、H₂O 氷粒子の場合には限界付着速度は 10 m s^{-1} 程度であることがわかった。ダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーション (Wada et al. 2009 など) によると、アグリゲイトの臨界破壊速度は 2 粒子間の限界付着速度のおよそ 10 倍である。つまり、CO₂ スノーラインの外側でアグリゲイトの臨界破壊速度は 10 m s^{-1} 程度、H₂O スノーラインの外側では 100 m s^{-1} 程度だと予想される。我々の計算から見積もられた氷ダストアグリゲイトの臨界破壊速度を仮定すると、原始惑星系円盤中でダスト粒子を cm サイズに成長させることができ、これは彗星が cm サイズの「ペブル」から形成されたというシナリオ (Arakawa & Ohno 2020 など) とは整合的である。一方で、原始惑星系円盤の観測からは、スノーラインより外側の領域でアグリゲイトのサイズは 0.1–1 mm 程度であるという結果もあり、このような小さなサイズを説明するためにはアグリゲイトの臨界破壊速度が 1 m s^{-1} よりも小さい必要がある (Okuzumi & Tazaki 2019 など)。今後、H₂O や CO₂ 以外の分子の「氷」マントルで覆われたダスト粒子についても限界付着速度が実験的に明らかになることで、原始惑星系円盤の化学状態とダスト成長の関係をより深く理解することができるようになることを期待している。