

衝撃波後面でのダスト衝突によるコンドリュールの破壊

松本 侑士 (国立天文台), 黒澤 耕介 (神戸大学, 千葉工業大学), AND 荒川 創太 (海洋研究開発機構)

コンドリュールは隕石中に見られる ~ 1 mm サイズの球状粒子である。コンドリュールは原始惑星系円盤内で溶融、表面張力で球形となった後、急冷凝固して形成したと考えられている (e.g., Scott 2007)。コンドリュールには一部にリムと呼ばれる小粒子がコンドリュールを覆う構造が見られる。リムは fine-grained rims と igneous rims の 2 種類が存在する。Fine-grained rims は $\sim 1 \mu\text{m}$ サイズ程度でマトリクスと呼ばれる隕石中の粒子に類似したダストからなり、原始惑星系円盤内でコンドリュールに集積され形成したとよく解釈されている (e.g., King & King 1981; Metzler et al. 1992)。Igneous rims は溶融を経験した $\sim 10 \mu\text{m}$ サイズ程度のダストからなる (e.g., Rubin 1984)。この溶融はコンドリュール形成と同じ過程によってなされたと解釈されている。

このコンドリュールの加熱メカニズムとして、衝撃波加熱 (e.g., Hood & Horanyi 1991) や微惑星衝突 (e.g., Johnson et al. 2015), あるいは雷 (e.g., Horányi et al. 1995) といった候補が挙げられている。本研究では衝撃波加熱モデルに着目する。衝撃波が通過するとガスの速度が減速し、またガス温度が上昇する。コンドリュールや igneous rim の先駆体にあたるダスト (以下リム先駆体ダスト) は小さく、衝撃波前面ではガスと同様に運動しているが、衝撃波後面ではガスが急速に減速されるためにガスとの間に相対速度が生じる。ダストはガス抵抗を受けてガスとの相対速度を減らすと共に加熱される。衝撃波後面でのダストの制動距離はダストサイズに依存するため、 $\sim 10 \mu\text{m}$ サイズのリム先駆体ダストは ~ 1 mm サイズのコンドリュール (先駆体) に比べて短い距離でガスとカップリングする。コンドリュールは依然として十分な制動を受けておらず、衝撃波前面の速度を維持しているため、コンドリュールとリム先駆体ダストは大雑把に衝撃波速度のオーダーの相対速度をもつようになる。ダストが溶融する衝撃波は $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ なので (Miura & Nakamoto 2005), 最大でこの程度の衝突速度でリム先駆体ダストとコンドリュールは衝突する。このような高速衝突においてリム先駆体ダストコンドリュールに付着せず、コンドリュールを欠損させる。

本研究では衝撃波後面でリム先駆体ダストとの衝突がどれほどコンドリュールの破壊に寄与するのかを調べた。1 次元衝撃波モデルを用い、コンドリュールとリム先駆体ダストの運動と温度進化を解いた (Matsumoto & Arakawa 2023)。これによりコンドリュールとリム先駆体ダストの衝突率、相対速度、溶融状況が求められる。これらの情報を基に、クレータスケール則 (Suzuki et al. 2012) に基づき衝突に伴うコンドリュールの質量欠損を求める。クレータ体積は標的の強度に依存する。固体コンドリュールの強度は Wada et al. (2018) を基に 10 MPa で与え、液体コンドリュールの強度は 0 とした。

コンドリュールサイズや衝撃波速度等をパラメータとした計算の結果、衝撃波後面でのコンドリュールとリム先駆体ダストの進化は 3 種類に分けられることがわかった。コンドリュールが小さくリム先駆体ダストサイズに近い場合には非衝突となる。コンドリュールも小さく制動距離が短いため、ダストとの相対速度は比較的上がらず、また短い距離で相対速度が 0 となる。コンドリュールが小さく、また相対速度が上がらないために衝突が起きなくなる。衝突が起きないため、コンドリュールは初期サイズを保持できる。非衝突条件はおおよそ制動距離と衝突率から見積もることができる。

あるサイズ以上のコンドリュールはリム先駆体ダストと衝突する。この衝突が液体コンドリュールに対して起こるか、固体コンドリュールに起こるか、という違いがコンドリュールの進化を変える。コンドリュールが小さく、かつ衝撃波速度が高いとき、コンドリュールは衝撃波後面で溶融する。このとき液体コンドリュールにリム先駆体ダストが衝突し、液体コンドリュールは破壊される。コンドリュールが大きく、かつ衝撃波速度が低いとき、コンドリュールは衝撃波後面で溶融しない。固体コンドリュールにはリム先駆体ダストが衝突するが、ダストとのサイズ比が大きいため、コンドリュールの一部が欠損されるのみで、コンドリュールほとんど初期サイズを保つ。

このコンドリュール破壊条件を満たすコンドリュールサイズは $\sim 100 - 1000 \mu\text{m}$ とコンドリュールの典型サイズと一致する。すなわちリム先駆体ダストが存在した場合、衝撃波による典型的なサイズのコンドリュール形成は阻害される。Igneous rims を持つコンドリュールの割合はコンドライトによって異なり、ほぼ igneous rims を持たないコンドリュールからなるコンドライトも存在するが、普通コンドライトで 10%, CR と CK で 30% 程度、CV に至っては 50% のコンドリュールが igneous rims を持つ。これらのコンドライトのコンドリュールを説明するには相応の igneous rims の溶融と集積イベントが必要であるが、これは衝撃波によるコンドリュール形成と同一のイベントではなかったと考えられる。

上記の結果に加えて、発表では液滴衝突の破壊条件についての紹介を行った。

REFERENCES

- Hood, L. L., & Horanyi, M. 1991, *Icarus*, 93, 259, doi: [10.1016/0019-1035\(91\)90211-B](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90211-B)
- Horányi, M., Morfill, G., Goertz, C. K., & Levy, E. H. 1995, *Icarus*, 114, 174, doi: [10.1006/icar.1995.1052](https://doi.org/10.1006/icar.1995.1052)
- Johnson, B. C., Minton, D. A., Melosh, H. J., & Zuber, M. T. 2015, *Nature*, 517, 339, doi: [10.1038/nature14105](https://doi.org/10.1038/nature14105)
- King, T. V. V., & King, E. A. 1981, *Icarus*, 48, 460, doi: [10.1016/0019-1035\(81\)90056-7](https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90056-7)
- Matsumoto, Y., & Arakawa, S. 2023, *ApJ*, 948, 73, doi: [10.3847/1538-4357/acc57c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acc57c)
- Metzler, K., Bischoff, A., & Stoeffler, D. 1992, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 2873, doi: [10.1016/0016-7037\(92\)90365-P](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90365-P)
- Miura, H., & Nakamoto, T. 2005, *Icarus*, 175, 289, doi: [10.1016/j.icarus.2004.11.011](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.11.011)
- Rubin, A. E. 1984, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1779, doi: [10.1016/0016-7037\(84\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90032-2)
- Scott, E. R. D. 2007, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 577, doi: [10.1146/annurev.earth.35.031306.140100](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140100)
- Suzuki, A., Hakura, S., Hamura, T., et al. 2012, *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 117, E08012, doi: [10.1029/2012JE004064](https://doi.org/10.1029/2012JE004064)
- Wada, K., Grott, M., Michel, P., et al. 2018, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, 82, doi: [10.1186/s40645-018-0237-y](https://doi.org/10.1186/s40645-018-0237-y)