

低速度衝突過程に関するダスト集合体の機械特性の測定

○友膳涼平、中村昭子（神戸大学大学院理学研究科）

背景と目的

ダスト集合体の機械特性は低速度衝突による成長過程について理解するために重要である。例えば、球の接触を記述する理論の1つにHertz理論^[1]があるが、それによると2球の正面衝突によって生じる最大の応力は粒径や相対速度、質量のほかにポアソン比やヤング率に依存する。また、ダスト集合体のヤング率といった弾性定数は、衝突時における塑性変形の起りにくさの指標として用いられることがある^[2]。

ダスト集合体の弾性定数を推定するために、弾性波速度測定が行われている。先行研究^[3]では不規則形状シリカダスト集合体の縦波速度測定を行い、その結果とポアソン比が0という仮定からヤング率の推定が行われた。本研究では、シリカダスト集合体の特性をさらに深く調べるために、縦波速度と横波速度両方の測定を行い、弾性定数の推定を行った。

実験手法

本研究では、形状および粒径の異なる3種類のシリカ粒子（球形小、球形大、不規則形状）を用いて実験を行った。各シリカ粉末を圧縮し、円柱形の試料を作製した。作製した試料に対してパルス透過法を適用し、縦波および横波速度を測定した。

測定した縦波および横波速度、試料の密度を用いてラメ定数を算出し、そこからポアソン比およびヤング率を導出した。また、特に不規則形状シリカでは、吸着水の影響を評価するため、水分計（MOC63u）により水分量を測定した。測定条件としては加熱温度を120°Cおよび200°C、加熱時間を3~12時間とし、さらに容器から取り出した後すぐに測定した試料と、実験室内で長時間放置した試料を比較した。これらの結果をもとに、弾性波速度・ヤング率の充填率依存性および水分量との関係を検討した。

結果と議論

弾性波速度は、いずれの試料においても充填率の増加に伴い増大する傾向を示した。球形粒子では、小粒径の方が大粒径よりも縦波・横波速度ともに高い値を示した。これは、粒径が小さいほど粒子接触点数が増加し、剛性が高くなることを反映していると考えられる。不規則形状シリカでは縦波速度のばらつきが大きく、先行研究^[3]よりも大きい値を示した。これは粒子表面に吸着した水分が少ないため接触強度が増加した可能性が高い。

水分量測定の結果、湿度70~75%の大気中で取り出したものや、この湿度で約一日放置

していた試料は水分量は約 0.3%であったが、湿度 90%程度の大気に数時間晒した試料では約 7%に達した。球状粒子換算では、水分量 0.3%で水膜厚さは約 4 nm、7%では約 100 nm に相当し、ダスト粒子間相互作用に大きな影響を及ぼすことが示された。これにより、不規則形状粒子で弾性波速度が増加・分散した要因として吸着水の寄与が強く示唆された。

縦波・横波速度から算出したヤング率は、充填率 $\phi = 0.5$ において $E = 0.165 \pm 0.023 \text{ GPa}$ であり、先行研究^[3]の推定値より約 6 倍大きかった。これは試料の乾燥状態や粒子表面状態の違いによる可能性がある。また、過去に実施した圧列引張試験 (Brazilian disk test) から得られた見かけのヤング率は約 0.03 GPa であり、弾性波速度測定から得られた値より大幅に小さかった。この差は、両手法における歪み速度の違いに起因すると考えられ、一般に歪み速度が大きいほどヤング率は大きく評価されることが確認された。焼結を経験した人工雪の先行研究^[4]との比較からも、材料内部構造や履歴がヤング率に大きく影響することが示された。

以上より、本研究はシリカダスト集合体の弾性特性が充填率、粒径、粒子形状、吸着水の量および歪み速度に強く依存することを明らかにした。今後は、より低充填率条件および十分に乾燥させた試料での測定を行い、衝突速度に対するヤング率の系統的な依存性を明らかにすることが課題である。

参考文献

- [1] Johnson, K.L. (1987). Contact Mechanics. Cambridge University Press.
- [2] Toyoda, Y.M., Arakawa, M., & Yasui, M. (2024). Low-velocity impact experiments of porous ice balls simulating Saturn's ring particles: Porosity dependence of restitution coefficients and the mechanism of inelastic collision. *Icarus*, 411, 115964.
- [3] Meisner, T., Wurm, G., & Teiser, J. (2012). Experiments on centimeter-sized dust aggregates and their implications for planetesimal formation. *Astronomy & Astrophysics*, 544, A138. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219099>
- [4] Shimaki, Y., & Arakawa, M. (2021). Tensile strength and elastic properties of fine-grained ice aggregates: Implications for crater formation on small icy bodies. *Icarus*, 369, 114646.

謝辞

本研究は JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設の共同利用実験として行いました。