

土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の低速度衝突実験： 反発係数及び付着特性に対する空隙率依存性

神戸大学大学院理学研究科 ○豊田優佳里 荒川政彦 保井みなみ

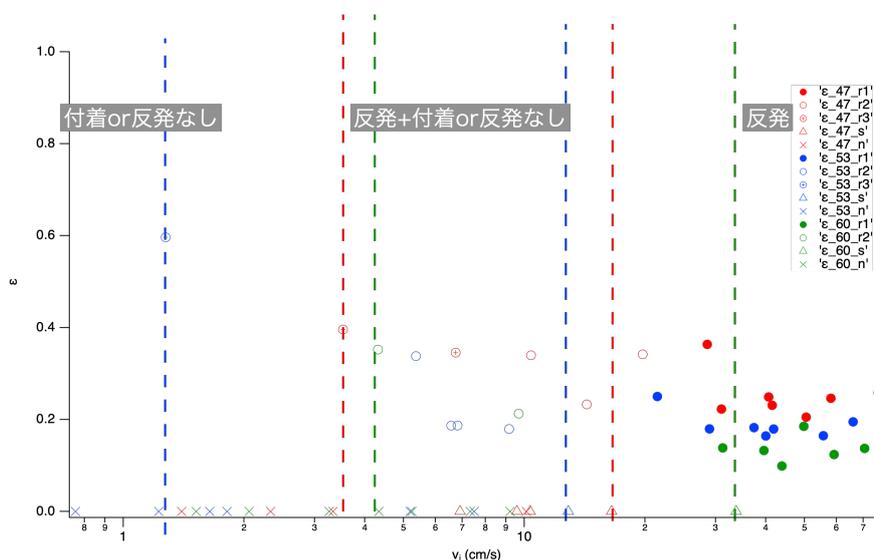
はじめに：土星リングは、サイズ数 cm から数 m までの水氷粒子で構成されており、その粒子は互いに衝突しながら土星の周りを公転している。その相互衝突の結果、リング粒子は凝集・反発・破壊を起こし、土星リングの力学的進化やその構造に影響を及ぼしている。また、土星リングが非常に薄い円盤状（幅数万 km, 厚さ約 100 m）を保っているのは、リング粒子が非弾性衝突を起こし、エネルギーを効果的に散逸しているためであると考えられている。リング粒子の力学的構造はよく知られていないが、惑星探査機カッシーニの観測や低い熱慣性から高空隙率の水氷粒子集合体であることが予測されている。表面の滑らかな氷や霜のついた氷の反発係数はこれまでに調べられているが、多孔質氷球の反発係数はこれまで詳しく調べられていない。そこで、多孔質氷球の衝突過程について詳しく調べる必要がある。本研究の目的は、多孔質氷球の反発係数及びエネルギー散逸のメカニズムを明らかにし、土星リング粒子の内部構造を推定することである。そのため、多孔質氷球と花崗岩板、氷板、多孔質氷板の 3 種類の板に対して低速度衝突実験を行い、衝突速度と反発係数の関係に対する空隙率依存性を調べた。

実験方法：本研究では球を板へ自由落下させて衝突実験を行い、反発係数を測定した。多孔質氷球（半径 1.5 cm, 空隙率 47, 53, 60%）は氷粒子（平均粒径 20 μ m）を球形に押し固めて作成した。また、標的板は花崗岩板、氷板、多孔質氷球と同様に作成した多孔質氷板（半径 1.5 cm, 高さ 2 cm の円盤状、空隙率 43 ~ 62%）を使用した。反発係数は衝突の時間間隔を測定することで求めた。衝突速度範囲は $v_i = 0.6 \sim 60$ cm/s であった。

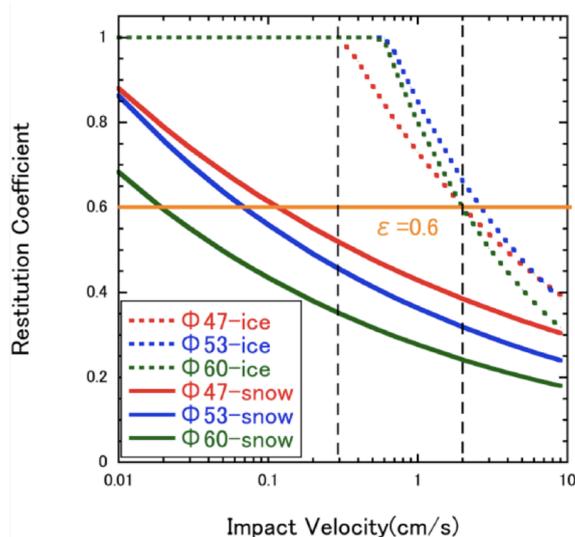
実験結果：多孔質氷球の反発係数は氷球の場合と異なり、衝突速度の増加とともに反発係数は下がり続け、準弾性領域は確認されなかった。また、空隙率が大きいほど反発係数は低くなる傾向が見られたが、衝突速度が小さくなる（ $v_i = 2 \sim 5$ cm/s 以下）と空隙率の差は収束していくことが確認された。この関係は経験式 $\epsilon = \epsilon_0 v^{-b}$ で表すことができ、 b は空隙率の増加に伴って大きくなる傾向があった（ $b = 0.17 \sim 0.47$ ）。

また、多孔質氷球は衝突速度が小さくなる（ $v_i = 10 \sim 30$ cm/s 以下）につれ、反発と付着が起こる混合領域が確認され、更に衝突速度が小さくなる（ $v_i = 1 \sim 4$ cm/s 以下）と反発が確認されなくなった。実験で得られた反発係数から衝突時のエネルギー散逸量、凹みの幅から圧縮体積を計算すると、その関係は経験式 $\Delta V = V_0 E_{dis}^n$ で表すことができた。その結果、 n は 0.75 ~ 1.5 となり、圧縮体積はエネルギー散逸量に比例することが示唆された。ここで、多孔質氷球の降伏応力を $Y_{d,i}$ とし、エネルギー散逸量が多孔質標的の塑性変形により起きたと仮定すると $E_{dis} = Y_{d,i} \Delta V$ と書くことができる。この関

係から求まる $Y_{d,i}$ は、空隙率 47%では 1.07 ~ 16.9 MPa, 空隙率 53%では 0.62 ~ 18.7 MPa, 空隙率 60%では 0.06 ~ 1.65 MPa であった。また、静的圧縮変形試験で計測された多孔質氷球の圧縮強度 $Y_{d,t}$ は、空隙率 47%では 0.34 ~ 5.73 MPa, 空隙率 53%では 0.2 ~ 2.77 MPa, 60%では 0.21 ~ 1.04 MPa となった。 $Y_{d,i}$ は誤差の範囲で $Y_{d,t}$ と一致したが、変形速度の違いにより $Y_{d,i}$ は $Y_{d,t}$ よりわずかに大きくなった。従って、多孔質氷球の衝突によるエネルギー散逸量は圧縮体積と圧縮強度によって説明できた。これより、多孔質氷球の反発係数の低下は多孔質氷の塑性変形によって説明できた。更に土星リングへと応用するため、実験で得られた反発係数と衝突速度の関係式を外挿した。その結果、多孔質氷同士の衝突は衝突速度 0.1cm/s 以上で 0.6 以下になることがわかった。この衝突速度は数値シミュレーションによって得られた土星リング粒子の衝突速度 (0.3-2 cm/s) とよく一致することがわかった。以上より、土星リング粒子は空隙率 47%以上の多孔質氷球であることが示唆された。



多孔質氷球と多孔質氷板の衝突における衝突速度と反発係数の関係



実験で得られた経験式の外挿結果