

学 位 論 文 題 名

Experimental Study on Restitution Coefficients of Ice Spheres with reference to the Evolution of Planetary Rings

(惑星リングの進化に関する氷球の反発係数の実験的研究)

学位論文内容の要旨

氷は外惑星の衛星、惑星リング、彗星などでその存在が確認されており、太陽系に多量に存在する重要な構成鉱物である。惑星リングは惑星の周りをケプラー運動している多数のリング粒子で構成されている。リング内では、軌道の交差による粒子どうしの衝突が起きるため、惑星リングの進化過程の研究において、リング粒子間の衝突の際に行われるエネルギー交換が重要である。土星リングは、cm サイズから m サイズの分布を持つ氷粒子で構成されているので、土星リングの進化過程を知るためには個々の氷の衝突の物理を解明した上で、軌道進化過程をシミュレートする必要がある。そのため低温下（ $\sim 100\text{K}$ ）で幅広い衝突速度-サイズ領域での氷球の衝突特性を解明する必要がある。本研究では氷球を氷ブロックに衝突させ、鉛直方向の氷球の反発係数（ ϵ ）について広い衝突速度（ $v_i = 1 \sim 1000 \text{ cm/s}$ ）、サイズ（氷球半径、 $r_p = 0.14 \sim 3.6 \text{ cm}$ ）、温度（ $T = 269 \sim 113 \text{ K}$ ）条件下で測定を行った。

試料は多結晶氷（粒径 $1 \sim 3 \text{ cm}$ ）を整形して制作した。ただし、氷球半径 $r_p = 0.14$ の試料は蒸留水を急冷することによって制作した。反発係数は高速度ビデオ（200 又は 500 フレーム/秒）または Acoustic-Emission センサーを用いて測定した。実験温度は、温度範囲 $269 \sim 245 \text{ K}$ では低温室の温度を調節して、低温度範囲 $215 \sim 113 \text{ K}$ では専用の低温制御装置を製作して用いた。低温制御装置の温度調節は冷却部（銅製）に液体窒素を循環させて行った。

実験の結果、反発係数は衝突破壊の起こり始める臨界速度（ v_c ）を用いて整理できた。反発係数は準弾性領域（ $v_i \geq v_c$ ）と非弾性領域（ $v_i < v_c$ ）に分けることができた。(1) v_i が v_c 以下の場合には v_i に関係なく、 ϵ は一定であり準弾性衝突が起こる。 ϵ の最大値は完全弾性体にはほぼ近い値（ $\epsilon \geq 0.95$ ）をとり、サイズ、温度依存性がほとんど見られなかった。しかし、 ϵ のばらつきが半径の減少とともに増加し、 ϵ の平均値が半径の減少とともに 0.95 ± 0.04 （ $r_p = 3.6$ ）から 0.71 ± 0.09 （ $r_p = 0.14$ ）へ減少した。これは氷試料の表面の不規則性に起因すると考えられ、表面の凸凹によって並進のエネルギーだけでなく回転や振動のエネルギーにも分配が起こるためである。(2) 一方、 $v_i > v_c$ の場合には、破壊を伴う衝突となり、 ϵ は v_i とともに減少した。 ϵ は v_c を用いて実験 $\epsilon \sim (\frac{v_i}{v_c})^{-\log(\frac{v_i}{v_c})}$ によって表された。この時 v_c は半径の減少とともに増加し、温度 $T \geq 228 \text{ K}$ では温度の減少とともに

増加したが、 $T \geq 228 \text{ K}$ では一定となった。この v_c のサイズ及び温度依存性は Hertz の理論を用いることにより、破壊せん断応力 (τ_c) の歪み速度 ($\dot{\epsilon}_z$) 及び温度依存性と解釈できる。破壊せん断応力の歪み速度及び温度依存性は、 $\dot{\epsilon}_z = A\tau_c^{n_c} \exp(-\frac{E_c}{RT})$ で整理できることが分かった。ここで R =気体定数、 A =定数、 $n_c \simeq 6.5$ 、 E_c =クラック形成の活性化エネルギーである。 E_c は、 $T \geq 228 \text{ K}$ で $E_c=49 \text{ kJ/mol}$ となり、 $T \leq 228 \text{ K}$ で温度依存性がほとんどない。この関係は、氷の静的な変形実験 (歪み速度 $\sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) でも脆性破壊において成り立つことが知られている。この時、応力のべき乗 n_c が高い値をとること、温度依存性が高温領域で見られるのに対して低温領域でほとんどなくなることと同様な傾向が見られた。この一致から、動的な衝突実験と静的な変形実験における破壊のメカニズムが同様なものであることが示唆される。

さらに、破壊せん断応力の歪み速度及び温度依存性から、任意の温度における氷球同士衝突における v_c のスケーリング則が得られるので、反発係数を見積もることができる。現在の土星メインリングの厚さ ($< 200 \text{ m}$) を理論的に説明するためには、リング粒子の反発係数は非弾性的 (例えば、 $v_i < 1 \text{ cm/s}$ で $\epsilon \sim 0.6$) である必要がある。しかしメインリングのサイズ-温度依存性を考慮しても、滑らかな表面の氷球の反発係数は予想される反発係数より弾性的 ($r_p = 10 \text{ m}$, $T \sim 100 \text{ K}$, $v_i < 1 \text{ cm/s}$ で $\epsilon \sim 1$) である。この事実は、土星リング粒子が滑らかな表面を持つ粒子ではないことを示している。一方、氷の破壊が反発係数の減少を伴うことを考慮すれば、土星のリングが、粒子の破壊を伴った粒子表面の粗さ形成によって反発係数を小さくする可能性がある。このことは、リングの進化がリング粒子の表層の進化によって決まることを示唆している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 前 野 紀 一

副 査 教 授 本 堂 武 夫

副 査 講 師 水 野 悠紀子

副 査 教 授 山 本 哲 生 (大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

Experimental Study on Restitution Coefficients of Ice Spheres with reference to the Evolution of Planetary Rings

(惑星リングの進化に関する氷球の反発係数の実験的研究)

氷は、外惑星の衛星、惑星リング、彗星などを構成する太陽系において極めて重要な鉱物である。特に、土星リングは数 cm から数十 m の大きさの氷粒子で出来ており、ケプラー運動する氷粒子は軌道の交差による頻繁な衝突によってエネルギー交換を行ない、リングの特徴的な直径や厚さを決定していると考えられている。本研究は、このような惑星リングの現在の姿およびその進化過程を解明するために不可欠ではあるが未だ明らかになっていなかった氷粒子の衝突特性を広い温度、速度範囲で詳細に調べ、惑星リング研究のための基礎データを確立したものである。研究は、氷球を氷ブロックに衝突させ、鉛直方向の反発係数 (ϵ) について広い衝突速度 (v_i : 1~1000 cm/s)、氷球半径 (r_p : 0.14~3.6 cm) および温度 (T : 269~113 K) の条件下で行われた。研究は4部からなり、第1部では惑星リングおよび氷の反発係数に関するこれまでの研究のレビュー、第2部では実験の装置と方法、第3部では実験結果、そして第4部では結果の議論と惑星リングの進化研究への応用が述べられている。

実験に用いられた試料は、多結晶氷 (粒径1~3 cm) を整形して製作された。氷球半径が0.14 cm の試料は蒸留水を凍結することによって作られた。反発係数は高速ビデオ (200又は500フレーム/秒) またはアコースティック・エミッション・センサーを用いて測定された。実験温度は、温度範囲269~245 Kでは低温室の温度を調節し、より低い215~113 Kでは専用の低温制御装置 (液体窒素使用) で調節された。

実験で求められた反発係数は衝突破壊の起こり始める臨界速度 (v_c) を用いて整理された。反発係数は準弾性領域 ($v_i \geq v_c$) と非弾性領域 ($v_i < v_c$) に分けら

れ、次の結果が得られた。(1) v_i が v_c 以下の場合には v_i に関係なく ϵ は一定であり、準弾性的に衝突が起こる。 ϵ の最大値は完全弾性体にほぼ近い値 ($\epsilon \geq 0.95$) をとり、サイズ、温度依存性がほとんど見られない。しかし ϵ のばらつきは半径の減少とともに増加し、 ϵ の平均値は半径の減少とともに 0.95 ± 0.04 ($r_p=3.6$) から 0.71 ± 0.09 ($r_p=0.14$) へ減少した。これは氷試料の表面の不規則性に起因すると考えられ、表面の凸凹によって並進のエネルギーだけでなく回転や振動のエネルギーにも分配が起こるためである。(2) 一方、 $v_i > v_c$ の場合には破壊を伴う衝突となり、 ϵ は v_i とともに減少する。 ϵ は v_c を用いて実験式 $\epsilon = (v_i/v_c)^{\log(v_i/v_c)}$ によって表された。この時 v_c は半径の減少とともに増加し、温度 $T \geq 228$ K では温度の減少とともに増加したが、 $T \geq 228$ K では一定となった。この v_c のサイズ及び温度依存性は Hertz の理論を用いることにより、氷の破壊せん断応力 (τ) の歪速度及び温度依存性として解釈された。破壊せん断応力の歪速度及び温度依存性の結果から求められた応力べき数は 6.5、活性化エネルギーは 49 kJ/mol であり、228 K 以下ではほとんど温度依存性が認められなかった。これらの結果は、氷の静的な変形実験 (歪速度 $\sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) における脆性破壊の場合と同様であり、同種の破壊メカニズムが関与していることが示唆された。

次に、破壊せん断応力の歪速度及び温度依存性を一般化することにより、任意の温度における氷球衝突に関する v_c のスケーリング則が求められた。その結果、任意の大きさの氷球の反発係数がどの温度でも見積もることが可能となった。最後に、得られた結果の応用の一例として土星リングが扱われた。理論によれば、現在の土星のメイン・リングの厚さ ($< 200 \text{ m}$) を説明するためにはリング粒子の反発係数は非弾性的 (例えば、 $v_i < 1 \text{ cm/s}$ で $\epsilon \sim 0.6$) である必要がある。しかし、本研究の結果により、リング粒子のサイズと温度依存性を考慮しても反発係数はより弾性的であり、現在の土星リング粒子が滑らかな表面を持つ氷球ではないことが結論された。また、氷の破壊が反発係数の減少を伴うことを考慮し、土星リングがリング粒子の衝突破壊による表面の粗さ形成を伴って進化してきたことが結論された。

審査員一同は、以上の成果が惑星リングの現在の構造および進化の研究に寄与するところが大きく、また申請者が研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位等も併せ、申請者が博士 (地球環境科学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。