

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870419

研究課題名(和文) 宇宙氷のレオロジーから解き明かす巨大氷衛星の熱史と衝突史

研究課題名(英文) Rheology of non-water ice: Implications for thermal and impact histories of large icy satellites

研究代表者

保井 みなみ (Yasui, Minami)

神戸大学・理学研究科・助教

研究者番号：30583843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：巨大氷衛星の熱史及び衝突史の解明に必要な熱進化モデルを構築するため、極低温・真空下で実験可能なパルスチューブ冷凍機付き大型真空チャンバーを開発し、水氷及びエタノール氷の作成を行った。氷試料の作成前に乾燥窒素をチャンバー内に循環させ、実験結果に影響する霜の影響を取り除くことができた。また、氷模擬物質を用いた周期振動実験を行い、エネルギー減衰率を求めた。エネルギー減衰率は周波数が小さくなるほど、指数関数的に減少することがわかった。最後に、氷衛星の衝突史の解明に重要な水氷の複数回衝突破壊実験を行った。その結果、衝突回数に依らず標的に与えられた衝突エネルギーの総計で破壊の程度が決まることがわかった。

研究成果の概要(英文)：To study the thermal and impact histories of giant icy satellites, a large vacuum chamber combined with a pulse tube refrigerator was developed, and the samples of water ice and ethanol ice were made in this chamber. Before making ice samples, dry nitrogen gas was circulated into the chamber to remove the frost which affects the conditions of sample surface and the degree of vacuum. Forced oscillation experiments were carried out to study the attenuation Q by using three materials (gum, sponge, and acrylic) simulating ice. The attenuation Q decreased exponentially with the decrease of the frequency. Finally, multiple impact experiments of water ice target were carried out to determine the impact strength. This parameter is also important to study the impact histories of icy satellites. The impact times were set from 1 to 10 times. As a result, the impact strength could be expressed as the total impact energy given to the same target, irrespective of impact time.

研究分野：実験惑星学

 キーワード：巨大氷衛星 熱進化モデル non-water ice レオロジー 周期振動実験 エネルギー減衰率 衝突史
 衝突破壊強度

1. 研究開始当初の背景

木星以遠の氷衛星の中には、直径2500kmを超える巨大氷衛星が存在する。それらの表面を構成する物質は、太陽距離によって大きく異なり、揮発性の低いH₂O氷から揮発性の高い窒素、メタン、アンモニアの氷まで様々である。一方、氷衛星表面には小天体の衝突で形成した大小様々なクレーターが存在するが、氷衛星が大きくなるにつれて、熱源により衛星内部の温度が上昇し、氷地殻が塑性変形し始める。すると、粘性緩和により表面のクレーターの深さが減少し、最終的に消失する。この粘性緩和によるクレーター深さの減少速度は、クレーターの緩和時間によって決まる。この緩和時間を決めるには氷衛星地殻のレオロジーが重要であり、それは地殻の構成物質と内部温度に依存する。従って、実際の氷衛星の内部温度範囲で、それを構成する物質のレオロジーを理解することが必要となる。

クレーターの緩和時間の決定には、氷地殻を構成する物質の流動特性を表す流動則を求めることが重要である。これまでは、氷衛星を模擬したH₂O氷・岩石混合物の静的圧縮実験を行い、流動則に対する岩石含有率依存性を明らかにした[1, 2]。一方、氷衛星表面はH₂O氷以外に窒素、メタン等の氷 (non-water ice) やその混合物で構成される。また、氷衛星内部で生じる推定流動応力は0.1MPa以下と非常に小さい。そこで、低応力下のnon-water ice及びその混合物の流動則を調べるための静的変形実験を行うことが必要となる。

一方、氷衛星の内部温度を決める熱源は、主に放射性壊変熱と潮汐加熱があるが、中でも潮汐加熱の影響を調べるには、エネルギー減衰率 Q 値が必要である。 Q 値は周期振動実験で得られるのだが、non-water iceの Q 値はまだ調べられていない。

[1] Yasui and Arakawa (2008), GRL 35, L12206.

[2] Yasui and Arakawa (2010), Icarus 210, 956-967.

2. 研究の目的

1を踏まえ本研究では、以下の3つの目的において、装置開発及び実験を行った。

- (1) non-water iceの静的変形実験及び周期振動実験を行うためには、極低温・真空下でこれらの実験ができる環境を作る必要がある。そこで、大型真空チャンバーとパルスチューブ冷凍機を組み合わせた装置を開発する。また、完成した装置を用いて、試料及びチャンバー内の温度測定を行い、non-water iceの試料作成法を確立する。
- (2) 周期振動実験は本研究が初めて行う実験であり、周期振動を与えて試料の応力と歪みの位相差を測定する必要がある。そのため、真空チャンバー内で実験を行う前に、室温下でその実験手法を確立させる必要がある。そこで、既存の変形試験

機を用いた周期振動実験の装置を開発し、non-water iceの模擬物質を用いた周期振動実験を行い、エネルギー減衰率を明らかにする。

- (3) 氷衛星の衝突史を明らかにするために重要な衝突破壊強度を調べるため、H₂O氷の複数回衝突破壊を行い、衝突破壊強度に対する衝突回数の影響を調べる。

3. 研究の方法

- (1) 神戸大学に既存のパルスチューブ型冷凍機に取り付ける大型真空チャンバーを導入した。また、チャンバー内で試料を作成し、そのまま実験を行うため、チャンバー内に試料設置用の治具を取り付けた。

次に、この装置が確実に稼働することを確かめるため、チャンバー内で試料作成及び温度測定を行った。試料はH₂O氷とエタノール氷とした。温度は2種類の熱電対を用いて試料の温度を直接測定し、熱電対による温度の違いと温度の低下時間を調べた。

- (2) 周期振動実験を室温下で行うため、神戸大学に既存の変形試験機を用いた周期振動実験システムを開発した。振動荷重を与えるためには周波数を変化できるアクチュエータ、試料の荷重を測定するためにはロードセル、変位を測定するためにはレーザー変位計を用いた。

次に、このシステムを用いて模擬物質を用いた周期実験を行った。模擬物質には耐震用ゴム、アクリル板、ポリエチレンスポンジシートを用いた。アクチュエータの振動数は0.05~10Hzと変化させた。変位及び荷重は、データロガーで電圧として記録した。

- (3) 北海道大学・低温科学研究所内にある低温室(-10°C)に設置された縦型一段式軽ガス銃を用いて行った。標的は重さの異なる立方体氷、弾丸には直径15mm、高さ10mmの円柱氷を用いた。衝突速度は80~500m/sとし、衝突破壊強度に対する衝突回数の影響を調べるために、1つの標的に対して1~10回衝突させた。衝突の様子は高速度カメラで撮影した。

4. 研究成果

- (1) 極低温、真空下で実験を行うための実験装置の開発

極低温、真空下で実験を行うためには、専用のチャンバーを使用する必要がある。そこで、大型の真空チャンバーを作製し、既存のパルスチューブ冷凍機付きチャンバーと組み合わせた専用装置を開発した。

図1は開発した真空チャンバーの写真である。開発初期は、パルスチューブ冷凍機を横向きにし、真空チャンバーの横窓に直接設置して、チャンバー内の温度計測を行った。温度計測には、2種類の熱電対を用いた。使用した熱電対は次の通りである。1つはK型熱電

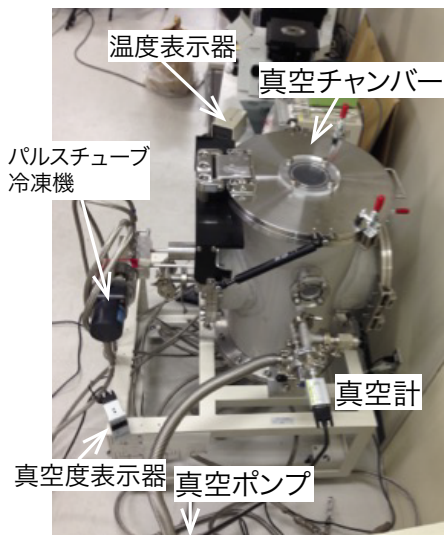


図1 開発した真空チャンバー。熱電対は後方の窓からチャンバー内に導入している。

対で、使用温度範囲が $-200\sim 1000^{\circ}\text{C}$ と幅広く、様々な分野でよく使用される。もう1つはAF型熱電対で、使用温度範囲が $-270\sim 30^{\circ}\text{C}$ と極低温測定に最適なものであるが、汎用性が低いため、現在入手困難となっている。2種類の熱電対を使用した理由は、極低温測定に最適なAF型熱電対が入手困難な為、K型と同時測定を行い、温度の差が無ければK型を使用できるためである。温度測定を行った結果、2種類の熱電対による温度差はほとんど見られなかったが、本来は100K以下まで冷却可能なパルスチューブ冷凍機が170Kまでしか低下しないことがわかった。原因を調べた結果、冷凍機を横向きに設置したことが温度低下を妨げていることが判明したため、新たにチャンバーの改良を行った。

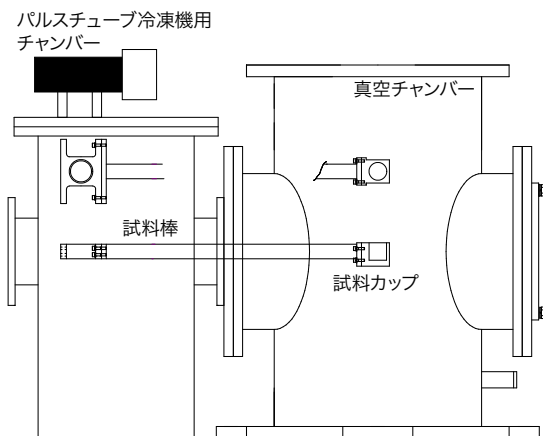


図2 改良した真空チャンバーの模式図

図2は改良したチャンバーの模式図である。パルスチューブ冷凍機用のチャンバーを設置し、縦向きに設置にして温度測定を再度行った結果、100K以下まで冷却することを確認した。また温度低下時間を測定したところ、約30分で冷却することがわかった。

次に、この改良したチャンバーを用いて、試料作成を行った。試料をチャンバー内で作

成するために、パルスチューブ冷凍機用チャンバーから試料棒を伸ばし、先端に試料カップを設置した。真空チャンバー上部には窓が付いており中を目視できるため、窓の真下に試料カップがくるように調整した。試料は H_2O 氷と non-water ice の中で比較的手に入れやすいエタノール氷を選んだ。試料カップに純水またはエタノール水を入れ、真空下(10Pa以下)で冷凍機を稼働する。その際、真空チャンバー内に残った水蒸気が試料表面や試料棒に付着し、霜となって発生する。その霜は真空引きの時間を長くし、また実験結果に対する試料の昇華の影響が大きくなる問題が生じる。そこで、真空引き・冷却前に真空チャンバー内に乾燥窒素を循環させ、チャンバー内の水蒸気を除去した。その結果、霜の出現は見られず、真空引きへの影響がないことを確認した。

試料カップ内で氷が作成されたことを確認するためには、目視が最も簡単である。 H_2O 氷は263K以下で表面に氷結晶を示す模様が確認され、問題なく H_2O 氷が作成された。また、100K以下に温度が低下しても、表面の様子は変化がないことも確認した。一方、エタノール氷は液体から固体への変化は目視で確認することができない。そこで、試料カップ内に熱電対を導入し、潜熱の放出による温度上昇を確認することにした。その結果、温度上昇は確認されなかったが、120~130K付近で一時、温度低下が見られなくなった。従って、この時点で固体に変化したと判断した。また、強引ではあるが真空チャンバーに振動を与えた結果、液体時は表面に揺れが確認できたが、120K以下では表面の揺れが確認されなかったため、エタノール氷が作成されたと確認できた。

今後は、他の non-water ice (液体から固体に変化する物質。メタノール、アンモニア、液体窒素など) の作成を試みる。

(2) 模擬物質を用いた周期変動実験

巨大氷衛星の熱進化モデル構築には、それを構成する物質(non-water ice)のエネルギー減衰率を明らかにする必要がある。それは周期振動実験から分かるパラメータである。周期振動実験は岩石などを用いて過去に行われているが[e.g., 3], 氷物質を用いた実験はほとんどなく[e.g., 4], まずは実験手法を確立する必要がある。そこで、(1)で作製した真空チャンバー内で non-water ice の周期振動実験を行う前に、室温下で実験手法を確立することにした。そこで、①既存の変形試験機を用いた実験システムの開発を行い、②模擬物質を用いて周期振動実験を行い、エネルギー減衰率を求めた。

① 実験システムの開発

図3は、開発した周期振動実験装置の模式図である。既存の変形試験機のピストン部を利用し、振動アクチュエータ、ロードセルを設置するシステムを開発した。本来の目的で

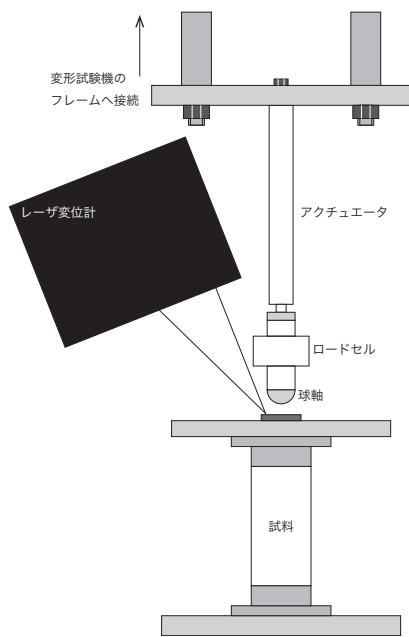


図3 周期振動実験システム

ある non-water ice は直径 30mm, 高さ 60mm の円筒形を想定しているため, その試料をロードセル下に固定できるように, 治具を用意した. ただし, 試料上面が必ずしも底面と平行であるとは限らず, 面で圧縮するピストンでは試料内に荷重の不均一性を生じてしまう. そこで, ロードセル先端に半球状の治具(球軸と呼ぶ)を取り付け, 試料上面が傾いても荷重の不均一性が生じないように, 一点で荷重を与えるようにした. 変位はレーザー変位計で測定した. レーザー変位計は本来, 重力に対して垂直に設置して使用するものであるが, 今回はできるだけ試料の中心部の変位を測定する必要があるため, 変位計を斜めに設置し, レーザーが試料の中心近くを示すようにした. これにより, 変位の絶対値は信用できなくなるが, エネルギー減衰率は変位と応力の位相差から測定するため, 相対値が重要であり, 絶対値が測定できないことは問題ない.

② 模擬物質の周期振動実験

①で作製したシステムを用いて, 模擬物質を用いた周期振動実験を行った.

エネルギー減衰率 Q 値は, 振動アクチュエータを用いて周波数 ω の振動的な力を与えた時の応力 σ と歪み ε の位相差から求めることができる. 以下に, その導入式を示す.

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t - \phi_\sigma), \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi_\varepsilon), \quad (2)$$

$$Q = \tan(\phi_\varepsilon - \phi_\sigma), \quad (3)$$

t は時間, ϕ_σ と ϕ_ε は応力と歪みの位相を示す. 実際に測定するのは荷重と変位であるが, 荷重は(応力) × (圧縮部分の断面積), 変位は(歪み) × (変形前の試料長さ)であり, 断面積と試料長さは時間変化しないため, 荷重と変位を応力と歪みの代わりに用いて計算することにする.

図4は, 耐震用ゴムを周波数 5Hz で周期振動させたときの荷重と変位の波形である. 荷

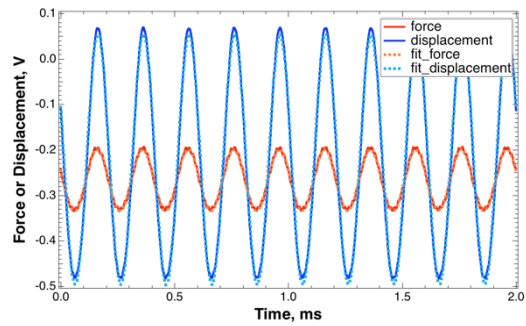


図4 ゴムに周波数 5Hz で周期振動を与えたときの荷重と変位の時間変化. 実線は実際の計測結果, 破線は式(4), (5)を用いて fitting した結果を示す.

重及び変位はデータロガーで電圧として記録するが, 電圧から各パラメータへの変換則は時間変化しないため, 電圧のまま用いることにする. ロードセルやレーザー変位計のゼロ値を合わせるのは非常に難しく, 振幅の中心がゼロ値と一致しないが, 位相差のみが重要であるため, 結果には影響しない. また, ロードセル自身の振動により, 荷重の波形にはノイズが見られるが, 振動波形に比べると小さいため, ここでは無視できるとする. 一方, ロードセルやレーザー変位計自身が若干動くことにより, 振幅の中心が常に一定ではないことが明らかになった. そこで, 式(1)と(2)を以下のように書き換えた.

$$F = F_0 + F_1 t + F_2 t^2 + F_3 \sin(\omega t - \phi_\sigma), \quad (4)$$

$$d = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 \sin(\omega t - \phi_\varepsilon), \quad (5)$$

荷重を F , 変位を d とし, 下付き文字 0~3 の付いた記号は, fitting parameter である. 式(4)と(5)を用いることで, 相関係数がよくなった. 式(4)と(5)から得られる位相 ϕ_σ , ϕ_ε と式(3)を用いて, エネルギー減衰率 Q を求めた.

図5は3つの模擬物質のエネルギー減衰率 Q 値と周波数 ω との関係を示したグラフである. 耐震用ゴムとスポンジシートの場合, 式(4)及び(5)を用いて fitting することができ

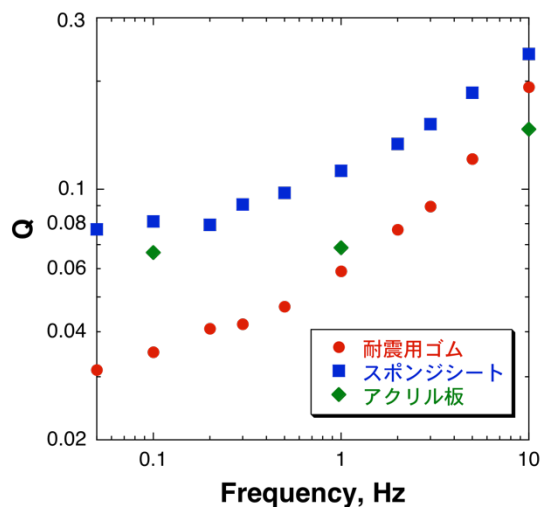


図5 エネルギー減衰率 Q^{-1} 値と周波数 ω の関係

た. この2つの試料の場合, 周波数が小さくなるほどエネルギー減衰率が小さくなった. つまり, エネルギーの媒質への吸収が小さくなることを意味する. また全体的に耐震用ゴムよりもスポンジシートの方が, エネルギー減衰率が大きくなることがわかった.

一方, アクリル板の場合, 周波数が1Hz以下ではほとんどエネルギー減衰率が変化しないように見える. アクリル板の場合, 式(4)及び(5)でfittingした結果, 半値幅が時間変化したため, 正弦波で表せないことがわかった. 従って, 図5で示すアクリル板のエネルギー減衰率は信用できない可能性が高い. アクリル板は他の2つの試料に比べて表面が固いため, 荷重に対して変位が非常に小さく, ノイズの影響が大きくなったことが原因として考えられる. これに関しては, 同じく固い表面を持つ氷試料でも同じ現象が起こることが予想されるため, 今後, 試料表面に振動を与える方法を工夫するなどの改善が必要である.

今後は, 表面の固い試料に対する周期振動実験の手法を見直し, (1)で作製した真空チャンバー内で実験を行うための治具を開発し, 実際に氷物質を用いた周期振動実験を行う予定である.

[3] McCarthy et al. (2011), JGR 116, B09207.

[4] McCarthy et al. (2008), LPS XXXIX abstract, #2512.

③ 多結晶氷の複数回衝突破壊実験

衝突破壊実験で用いるパラメータの1つに, エネルギー密度 Q_j がある. Q_j は, 式(6)のように示される.

$$Q_j = 0.5m_p v_i^2 / (M_{t,j} + m_p) \quad [\text{J/kg}], \quad (6)$$

m_p は弾丸質量, $M_{t,j}$ はj回目の衝突前の標的質量で M_{t0} は初期の標的質量, v_i は衝突速度である.

図6は, 総エネルギー密度 ΣQ_s が約105J/kgで, 衝突回数が1, 2, 4回の時の積算個数分布を示す. 総エネルギー密度 ΣQ_s は

$$\Sigma Q_s = \sum_{j=1}^n Q_j \quad (j = 1 - 10), \quad (7)$$

と示され, 1つの標的に与えられるエネルギー密度の総計を表す. 図6から, 積算エネルギー密度が同じ場合, 最大破片質量(積算個数が1の時の規格化破片質量)はほぼ同じになるが, 細粒破片量は衝突回数が小さいほど, 多くなることがわかった. このことから, 最大破片質量と細粒破片量を決めるパラメータが異なることが想定されるため, これらを別々に考えることにする.

最大破片質量 m_1 は, 衝突破壊の規模を示す衝突破壊強度を決める重要なパラメータである. 衝突破壊強度 Q_s^* は, 規格化最大破片質量 m_1/M_{t0} が0.5になるとき(つまり, 最大破片が初期の標的質量の半分の質量を持つ場合)のエネルギー密度 Q_j を意味する. 最終ショットのエネルギー密度 Q_j と規格化最大破片質量 m_1/M_{t0} の関係を調べた結果, 衝突回数が多く

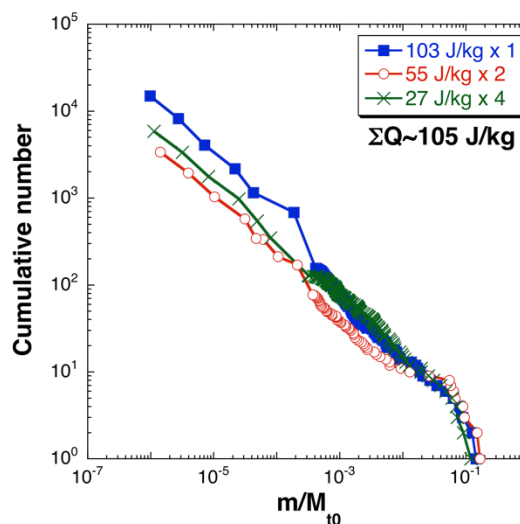


図6 積算個数分布. プロットの違いは衝突回数の違いを示す. m は破片質量, M_{t0} は初期の標的質量.

なるほど規格化最大破片質量 m_1/M_{t0} が小さくなることがわかった. つまり, 破壊しやすいということである. そこで, エネルギー密度の代わりに総エネルギー密度 ΣQ_s で示したのが, 図7である. 図7から, 総エネルギー密度 ΣQ_s で示すと衝突回数に依らずデータがほぼ一致することがわかった. 規格化最大破片質量 m_1/M_{t0} が0.95以下のデータを全てfittingした結果,

$$m_1/M_{t0} = 1.1 \times 10^4 \Sigma Q_s^{-2.3}, \quad (8)$$

と示された. そこで, 規格化最大破片質量 m_1/M_{t0} が0.5になるときの総エネルギー密度 ΣQ_s を衝突破壊強度 ΣQ_s^* と再定義した. そして, 衝突破壊強度 ΣQ_s^* は衝突回数に依らず77.6 J/kgとなった. これは, Kato et al. [5]の1回衝突の衝突破壊強度71.5J/kgに非常に近くなった.

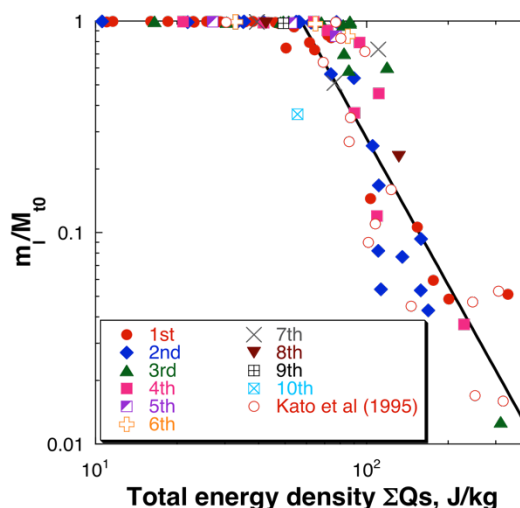


図7 総エネルギー密度 ΣQ_s と規格化最大破片質量 m_1/M_{t0} の関係. プロットの違いは衝突回数の違いを示し, Kato et al. [5]は同じ氷標的を用いた1回衝突の結果である. 実線は式(8)を用いてfittingした結果である.

次に、細粒破片量 n_m を考える。細粒破片量 n_m は図6で示す積算個数分布において、規格化破片質量 m/M_{t0} が約 10^{-6} になるときの積算破片個数と定義した。図8は、エネルギー密度 Q_j と細粒破片量 n_m の関係を示したグラフである。図6から、細粒破片量 n_m は総エネルギー密度 ΣQ_s が同じでも衝突回数によって変化することが予想されたため、エネルギー密度 Q_j で考えることにした。その結果、衝突回数に依らず、エネルギー密度 Q_j が同じであれば細粒破片量 n_m が一致することがわかった。全てのデータをfittingした結果、

$$n_m = 10.6Q_j^{1.3}, \quad (9)$$

と示された。

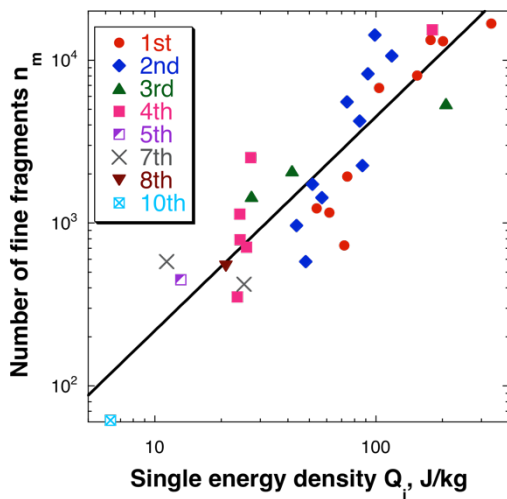


図8 エネルギー密度 Q_j と細粒破片量 n_m の関係。プロットの違いは衝突回数の違いを示す。実線は式(9)でfittingした結果である。

[5] Kato et al. (1995), *Icarus* 113, 423-441.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Minami Yasui, Eri Matsumoto, and Masahiko Arakawa, Experimental study on impact-induced seismic wave propagation through granular materials, *Icarus* 260, 320-331, 2015. (査読有)
DOI:10.1016/j.icarus.2015.07.032
- ② Minami Yasui, Ryo Hayama, and Masahiko Arakawa, Impact strength of small icy bodies that experienced multiple collisions, *Icarus* 233, 293-305, 2014. (査読有)
DOI:10.1016/j.icarus.2014.02.008

- ③ 荒川政彦, 保井みなみ, 寫生有理, “太陽系における高速度衝突現象と惑星の起源と進化”, 日本高圧力学会学会誌「高圧力の科学と技術」, vol. 24, No. 1, 13-20, 2014年2月 (査読有)

[学会発表] (計4件)

- ① 保井みなみ, 荒川政彦, 氷・岩石混合物のレオロジーに関する実験的研究: 宇宙雪氷学的应用, 日本地球惑星科学連合大会2015年大会, 幕張メッセ (千葉県), 2015年5月24日-5月28日 (招待講演)
- ② 保井みなみ, 羽山遼, 荒川政彦, 事前衝突を経験した多結晶氷の衝突破壊条件に関する実験的研究: 氷天体の蓄積ダメージの見積もり, 日本惑星科学会2013年度秋季講演会, 石垣市民会館 (沖縄県), 2013年11月20日-22日 (口頭)
- ③ Ryo Hayama, Minami Yasui (presenter), and Masahiko Arakawa, Experimental study on the impact strength of icy bodies damaged by multiple collisions, 8th Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System, Hawaii, U.S., June 24-27, 2013. (oral)
- ④ 羽山遼, 荒川政彦, 保井みなみ, 寫生有理, 複数回衝突を受けた氷天体の衝突破壊強度に関する実験的研究, 日本地球惑星科学連合大会2013年大会, 幕張メッセ (千葉県), 2013年5月19日-24日 (ポスター)

[図書] (計1件)

- ① 保井みなみ (分担執筆), 新版雪氷辞典, 古今書店, pp. 315, 2014年3月

[その他]

- ① 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻ホームページ
<http://www.planet.sci.kobe-u.ac.jp/experiment/yasui.html>
- ② 実験惑星科学研究室ホームページ
<http://eps1.sakura.ne.jp/EPSSL-Kobe/Welcome.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

保井 みなみ (YASUI, MINAMI)
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30583843