

令和元年6月6日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17794

研究課題名(和文)重力支配域における氷のクレータースケール則の確立と冥王星の進化史の解明

研究課題名(英文)Crater scaling law of water ice in the gravity regime: Implications for impact history of Pluto

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：冥王星のクレーター年代学に適応可能な氷の重力支配域のクレータースケール則を調べるため、縦型の衝突実験装置を開発し、未焼結氷の極低温下でのクレーター形成実験を行った。その結果、-148℃以下、真空下で重力支配域に典型的な「お椀型クレーター」が確認され、そのスケール則を確立することができた。また、高速下での焼結氷のクレーター形成効率を調べ、多結晶氷よりもクレーター形成効率が下がり、衝突溶融の影響が予想された。さらに、冥王星の表面地形の形成条件を明らかにするため、氷・岩石混合物の等歪速度一軸圧縮実験を行い、脆性・塑性境界を示す歪速度が岩石濃度の増加と共に大きくなることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷天体表面上の衝突クレーターは、そのサイズ頻度分布から絶対表面年代を推定することができ、そのためには極低温下での氷の重力支配域のクレータースケール則が必須であった。しかし、実験技術の困難さから、これまで調べられた例がなかった。今回の研究で、初めて極低温下における氷の重力支配域のスケール則を構築することができた。このスケール則は、衝突物理分野において今後、世界標準として広く汎用されることが期待される。さらに、このスケール則を用いることで冥王星だけでなく、外惑星領域の全ての氷天体の表面年代を推定することができ、その熱史、衝突史、地質活動史に新たな知見が得られることが期待される。

研究成果の概要(英文)：To examine the crater scaling law for crater radius of water ice in the gravity regime applicable for crater chronology on Pluto, we developed new vertical gas gun in the cold room and conducted cratering experiments of non-sintered snow at very low temperature. As a result, a bowl-shaped crater cavity, which is a typical crater shape in the gravity regime, was observed under vacuum and at <148 degC, and the crater scaling law could be constructed. We also conducted impact experiments of sintered snow at high impact velocity (>1 km/s) to examine the cratering efficiency, and found that the cratering efficiency was lower than that of polycrystalline ice due to the impact melting.

Furthermore, we conducted uniaxial compression tests under constant strain rate on ice-silica mixtures to clarify the tectonics of surface features on icy bodies such as Pluto, and found that the strain rate showing the ductile-to-brittle transition increased with the increase of the silica volume fraction.

研究分野：実験惑星学

キーワード：クレータースケール則 重力支配域 未焼結氷 極低温 クレーター形成実験 衝突溶融 脆性・塑性境界歪速度 一軸圧縮実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

冥王星の表面は、衝突クレーターが多く存在する古い領域と、クレーターがほとんど無く活動的な若い領域に明確に分かれていることが確認されている。天体の表面年代は、過去の進化イベントが起きた時期を特定し、その天体の進化過程を明らかにするために必須の情報である。

固体天体の表面年代の多くは、天体表面のクレーターサイズ頻度分布を用いたクレーター年代学を利用して決められる[1]。月の場合はアポロ試料の放射性年代と組みあわせて、絶対年代として表面年代が決まっている。一方、他の天体の年代は月表面のクレーター密度と絶対年代との関係を、クレータースケール則を用いて補正して決定される。スケール則とは、衝突体や標的天体の物理条件（サイズ、力学物性、衝突速度など）とクレーターサイズを関係付けるモデルである。冥王星は、 N_2 氷や CO 氷で表面が覆われているが、3000m 級の高さをもつ山脈が発見されたことから、地殻の基盤は H_2O 氷である可能性が高い[2]。そして、冥王星の場合、探査機 *New Horizons* で観測可能なサイズのクレーターは、クレーターサイズが地殻の強度よりも天体の重力により決まる重力支配域であると考えられる。従って、冥王星でクレーター年代学モデルを適用するためには、 H_2O 氷の重力支配域におけるスケール則を明らかにすることが必要となる。

地上で重力支配域のスケール則を調べる場合、強度の影響を考慮する必要がない粉体を用いて実験することが多い。氷天体を想定する場合は雪を用いる必要があるが、氷粒子は焼結により粒子同士が結合し、 $-10^{\circ}C$ でも数分で強度を持ってしまう。 H_2O 氷の重力支配域のスケール則を求めるためには、未焼結の雪を用いなければならないことが *Croft*[3]によって指摘されているが、これまで未焼結雪を用いてスケール則を調べた研究例はない。

2. 研究の目的

1を踏まえて本研究課題では、以下の4つの目的において、装置開発及び実験を行った。

- (1) 衝突実験装置の開発：冥王星表面温度は $-220^{\circ}C$ 以下と非常に低く、その表面は未焼結雪で覆われている可能性がある。極低温下で未焼結雪を用いたクレーター形成実験を行うため、既存の低温室に設置されている大型チャンバーに取り付けるための、新たな弾丸加速装置を開発する。また、この装置を用いた本実験での衝突条件を決定するため、予備実験として弾丸の速度と衝突条件（ガス圧、サボ質量）の関係を明らかにする。
- (2) 低速度での未焼結雪のクレーター形成実験：(1)で製作した衝突実験装置を用いて、 $-50^{\circ}C$ 以下の未焼結雪を用いた低速度の衝突クレーター実験を行い、クレーターサイズと雪標的の温度（焼結度）の関係を明らかにする。
- (3) 高速度での焼結雪のクレーター形成実験：(1)の衝突装置では再現出来ない km/s スケールの高速度でのクレーター形成実験を、既存の二段式軽ガス銃を用いて行う。そして、クレーター形成効率と衝突溶融度の関係を明らかにする。
- (4) 氷・岩石混合物の変形実験：冥王星表面で確認されている流動地形と破壊地形等の様々な表面地形の形成条件を明らかにするため、氷・岩石混合物を用いた変形実験を行い、脆性・塑性境界歪速度と岩石含有率の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

2で述べた各目的における研究手法を以下に述べる。

- (1) 神戸大学の低温室内に設置されている大型真空チャンバーに取り付けるための縦型一段式軽ガス銃を導入した。また、銃身内径より小さな直径をもつ弾丸を加速させるため、サボ分離システムを取り付けた。次に、この衝突実験装置の性能を確認するため、高圧室に導入する加速用のヘリウムガスの圧力とサボの質量を変化させて、衝突速度を調べた。弾丸には銃身内径と同じ直径 $4.5mm$ のポリアセタール球と、直径 $2mm$ のアルミ球及び鉄球を用いた。直径 $2mm$ の弾丸は、直径 $4.5mm$ 、長さ $5mm$ の円柱形のポリエチレンをサボとして用いて、その先端に弾丸を設置して加速させた。サボの重さは $70mg$ と $110mg$ である。この性能確認実験は、室温下で行った。ヘリウムガスの圧力は $0.05\sim 1.5MPa$ 、真空度は大気圧 (10^5Pa) または $20Pa$ 以下とした。
- (2) 標的は、円筒形容器（直径 $10\sim 15cm$ 、高さ $5\sim 5.8cm$ ）に氷粒子を液体窒素と交互に入れて作成した。このため、試料内部温度を数十分程度 $-200^{\circ}C$ 程度に保つことができ、雪の焼結を防ぐことができた。氷粒子は水道水を冷凍庫内で凍結した氷をブレンダーで粉碎し、篩で粒径 $710\mu m$ 以下に分けた粒子を使用した。雪試料の空隙率は $51\pm 2\%$ である。実験前後の試料内の温度を測定するため、容器の底または標的の表面に熱電対を設置した。実験は、(1)で製作した縦型一段式軽ガス銃と、神戸大学に既存の大型縦型一段式軽ガス銃を用いて、次の2つの条件で実験を行った。1つは大気圧・室温下で行った。弾丸は直径 $3mm$ のナイロン、ガラス、アルミナ、ジルコニア、鉄、鉛球を用いて衝突速度は $115\sim 177m/s$ とした。標的試料の実験直前の温度は $-191\sim -53^{\circ}C$ であった。もう1つは真空 ($170\sim 210Pa$)・低温下で行った。弾丸は直径 $2mm$ のアルミ、鉄球を用いて衝突速度は $72\sim 122m/s$ とした。標的試料の実験直前の温度は $-206\sim -112^{\circ}C$ であった。両条件の実験において、高速カメラを用いてクレーター形成中の氷粒子の噴出を観察した。
- (3) 標的は、円筒形容器（直径 $10cm$ 、高さ $10cm$ ）または直方体 ($13cm\times 13cm\times 10cm$) に氷粒子を詰めて作成した。氷粒子は、液体窒素に水を吹きつけて急速凍結させた直径数 $10\mu m$ の氷微粒子を使用した。雪試料の空隙率は $45\sim 70\%$ とした。実験は、神戸大学に既存の横型二

段式軽ガス銃を用いた。この軽ガス銃は横撃ちのため、標的は重力方向の崩壊を防ぐため、 -20°C の冷凍庫内で2~7日間焼結させた。弾丸は直径4.7mmのポリカーボネイト球と直径2mmのナイロン、ガラス、アルミ、鉄、ポリカーボネイト球を用いて、衝突速度は1.0~5.8km/sとした。

- (4) 氷・岩石混合物には粒径約850 μm 以下の氷粒子(2と同じ作成方法)と、直径0.25 μm のシリカビーズを混ぜて作成した。試料の空隙率を5%以下にするため、シリカと氷粒子を混合させたものと温度 0°C の液体の水を交互に型に入れて押し固めて作成した。試料のサイズは直径30mm、高さ30または60mmである。シリカ体積含有率 f は0, 0.06, 0.18とした。実験は、アメリカ・ダートマス大学で行った。低温室に設置された変形試験機を用いて、等歪速度一軸圧縮実験を行った。歪速度は 10^{-5} - 0.6s^{-1} とした。温度は -10°C である。

4. 研究成果

(1) 衝突実験装置の開発

衝突実験装置は、高圧室、銃身、サボ分離部の3部からなる。高圧室及び銃身は、市販部品(Swagelok社製)を用いて組み立てた。弾丸の加速方法は、従来のダイヤフラム破裂式(薄膜を高圧室と銃身の間に設置し、薄膜をソレノイドの先端に設置した針で破裂させることで、弾丸を加速させる)ではなく、バルブ開閉式(電磁弁に電流を流すことで高圧室入口を開閉する)を採用したことで、低コストだけではなく、毎回の実験での準備負担の軽減が可能となった。サボ分離部は、有限会社エスバックに製作を依頼した。銃身内径4.6mmより小さな径の弾丸を使用するため、銃身先端にサボ分離用の治具(中心の穴を台錐形とし、弾丸を先端に設置したサボを治具に衝突させて弾丸のみを加速する)を取り付けた。また、銃身周りに穴の空いた円筒治具を設置し、サボ後方から来るヘリウムガスを拡散させ、試料に影響を及ぼさないようにした。また、底部にアクリル製の回収BOXを設置し、サボ分離部先端をBOXの入口に設置することで、拡散したガスが再び試料に影響を与えないようにした。衝突装置全体の写真を図1aに示す。

この装置の性能を確認するため、衝突条件と衝突速度の関係を調べた(図1b)。直径2mmの弾丸の場合、アルミ球と鉄球で衝突速度の違いは見られなかった。一方、サボを使用していないポリアセタール球の場合、サボを使用した2mm弾丸と比べて、同じ圧力差でも約1.4倍衝突速度が大きくなった。また、サボの質量が大きい場合(110mg)は小さい場合(70mg)に比べて、衝突速度がほぼ同じか、約0.7倍小さくなった。小さいサボを利用した場合、圧力差0.15~1.6MPaまで衝突速度が指数関数的に増加し、その経験式は $V_i = 121.7\Delta P^{0.31}$ (V_i は衝突速度、 ΔP は圧力差)と示されることが分かった。この結果を基に、(2)の衝突条件を決定した。

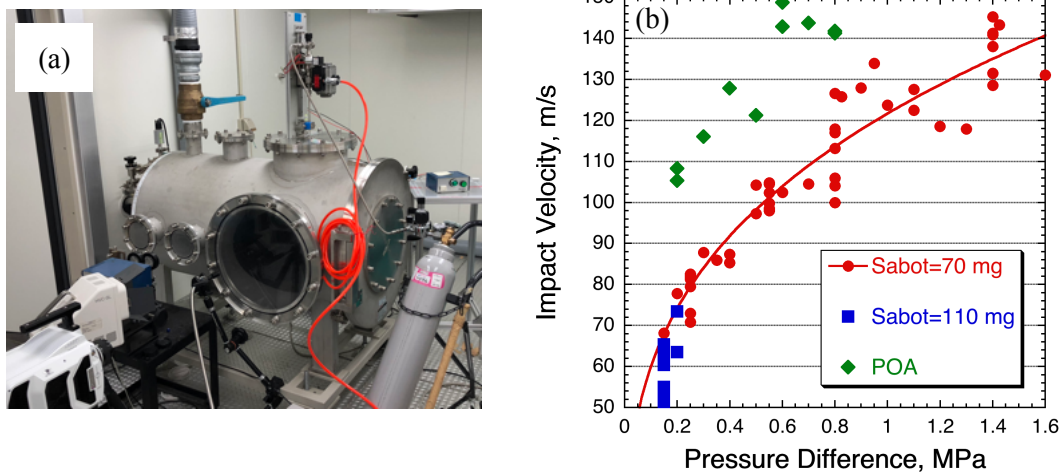


図1 (a) 衝突実験装置の全体写真。(b) 衝突速度と圧力差(ヘリウムのガス圧と真空度との差)の関係。赤と青が直径2mmの弾丸を使用した場合で、赤がサボが70mg、青が110mgである。緑がポリアセタール球の場合を示す。赤の実線はサボが70mgの場合の結果をベキ乗則で表した経験式である。

(2) 低速度での未焼結雪のクレーター形成実験

図2a, bは、真空下で衝突速度約120m/sの温度によるエジェクタカーテンの違いを示している。時間はクレーター形成時間($=\sqrt{R/g}$, R はクレーター半径, g は重力加速度)を示している。カーテンの形状に大きな違いは見られないが、 -206°C の場合に比べて -127°C の方が噴出量が少なくなった。これは、焼結により氷粒子が結合して強度を持ったためだと考えられる。図2cは、温度と周囲大気圧の異なる4つの環境でのクレーターの写真を示している。弾丸は真空下では鉄弾丸、大気圧下では鉛弾丸である。真空下ではお椀型クレーターでクレーターリムははっきり見られるが、温度が高くなるとクレーターサイズが小さくなった。一方、大気圧下ではクレーターは崩れていびつになり、リムははっきり確認できなかった。このように、温度や周囲大気圧の違いは、クレーター形状やサイズに大きく影響を与えることがわかった。

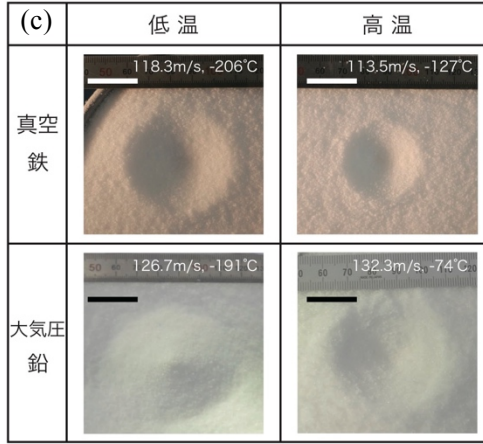
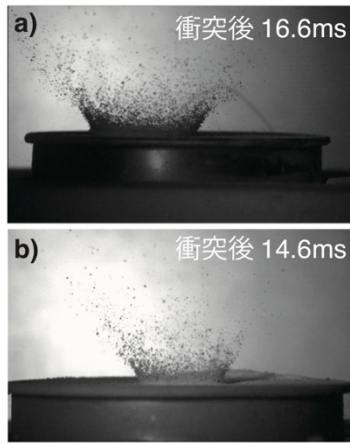


図2 (a, b) エジェクタカーテンの様子. (a)は-206°Cで118m/s, (b)は-127°Cで114m/s. (c) 形成されたクレーター. スケールバーは2cmを示す.

図3aはクレーター直径と弾丸の運動エネルギーの関係を、温度と周囲大気圧の異なる4つの環境で示した結果である. このグラフから、運動エネルギーが0.2J以下では、温度と周囲大気圧の影響はほぼ見られず、運動エネルギーの増加とともにクレーター直径が緩やかに増加するが、0.2J以上になると温度が低いほどクレーター直径が大きくなるのがわかった. 運動エネルギーが高い方が、焼結による強度の影響が出ていると思われる.

次に、図3aの結果を用いて氷の重力支配域のクレータースケール則を調べた. スケール則とは、衝突条件とクレーター半径の関係を無次元量を用いて表した式であり、先行研究[4]から式(1)で示されることがわかっている.

$$R \left(\frac{\rho}{m} \right)^{1/3} = H_1 \left(\frac{ga}{U^2} \right)^{-\mu/(2+\mu)} \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{(2+\mu-6\nu)/[3(2+\mu)]} \quad (1)$$

ここで、 m は弾丸質量、 δ は弾丸密度、 a は弾丸半径、 ρ は標的密度、 U は衝突速度、 g は重力加速度、 R はクレーター半径、 H_1 、 μ 、 ν は実験で得られる定数である. $R(\rho/m)^{1/3}$ を π_R 、 ga/U^2 を π_2 、 ρ/δ を π_4 と π パラメータとして示す. π_4 のベキを決めるために、 π_2 を一定にした場合(衝突速度 130 ± 10 m/s)の π_4 と π_R の関係を調べた結果、 $\pi_R = 6.83\pi_4^{0.20}$ を得ることができた. 図3bは π_2 と π_R の関係を示しており、密度比の依存性を考慮して π_R は $\pi_4^{0.20}$ で規格化している. この結果から、3つの温度と周囲大気圧環境下で、以下の経験式を得ることができた.

$$\pi_R = 0.247\pi_2^{-0.262}\pi_4^{0.20} \quad (\text{真空下, low T}) \quad (2)$$

$$\pi_R = 0.241\pi_2^{-0.251}\pi_4^{0.20} \quad (\text{大気圧下, low T}) \quad (3)$$

$$\pi_R = 0.245\pi_2^{-0.239}\pi_4^{0.20} \quad (\text{大気圧下, high T}) \quad (4)$$

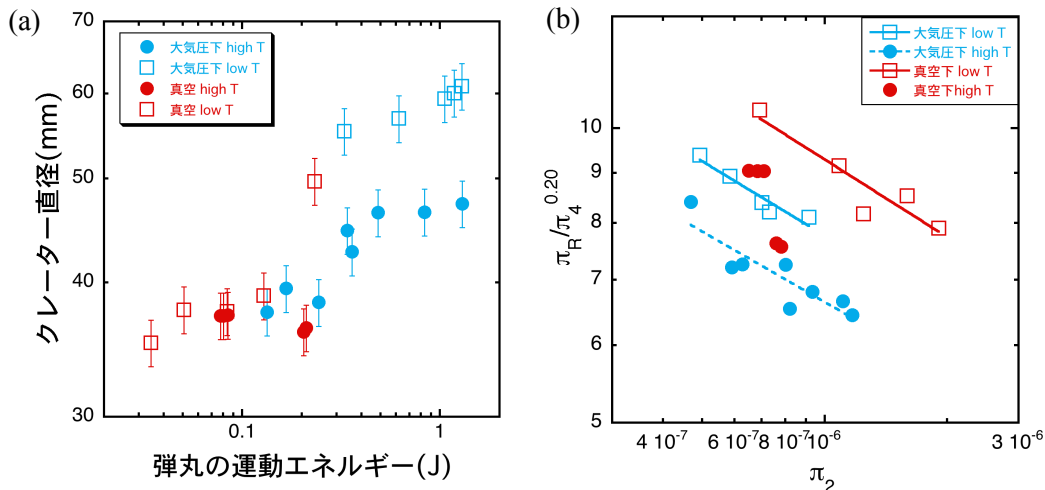


図3 弾丸の運動エネルギーとクレーター直径の関係(a)と、 π_2 と π_R ($\pi_4^{0.20}$ で規格化)の関係(b)を示す. 大気圧下の high T は-53~-103°C, low T は-190.5°C, 真空下の high T は-112~-147°C, low T は-148~-206°Cである. (b)の線は式(2)~(4)を示している.

このように、衝突条件を考慮したスケール則を用いて結果を整理したにも関わらず、温度と周囲大気圧で結果が変化した理由は2つある. 温度が高い場合、標的の氷粒子同士が結合を持ち、標的全体が強度を持ったため、クレーター形成効率が小さくなったと考えられる. 一方、大気圧下では、標的が空気の粘性抵抗の影響を受けて、クレーター形成効率が小さくなったことが考えられる. 従って、冥王星の環境に応用可能なのは、真空・低温下の式(2)であると期待できる.

(3) 高速度での焼結雪のクレーター形成実験

高速度のクレーター形成実験の結果、ある衝突条件下においてクレーターの底部または壁面の雪が解けて再凍結した衝突溶融層（図 4b の黒い領域）が確認された。その衝突条件を示したのが図 4a である。今回の実験では、空隙率が大きいほどより高速度で衝突溶融層が確認された。例えば、空隙率が 50% では 1.5km/s 以上、70% では 3.0km/s 以上であった。

形成されたクレーターは、衝突速度 1km/s を除き、中心にピットと呼ばれる凹み（黒い領域）を持ち、その周囲をスポールと呼ばれる引張破壊によって引き剥がされた非対称のクレーターが形成された（図 4b）。これは典型的な強度支配域のクレーター形状であり、(2)とは全く異なることがわかった。このスポールで引き剥がされた領域の円相当半径をスポール半径とし、(2)と同様にクレータースケール則を調べた。ただし、この場合は強度支配域であるため、[4]で提案された以下の式(5)を用いなければならない。

$$R \left(\frac{\rho}{m} \right)^{1/3} = H_2 \left(\frac{Y}{\rho U^2} \right)^{-\mu/2} \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{(1-3\nu)/3} \quad (5)$$

ここで、 Y は標的の引張強度であり、 $Y/\rho U^2$ を π_Y と示す。引張強度は[5]で求められた経験式から各空隙率での強度を得ることができる。 π_R と π_Y の関係を示したのが図 4c である。この結果、空隙率 50~70%の焼結雪のスケール則は $\pi_R = 0.40\pi_Y^{-0.19}$ となり、空隙率依存性はみられなかった。さらに、多結晶氷[6]と比較すると、クレーター形成効率 π_R が小さくなることがわかった。これは衝突溶融による影響と考えられる。

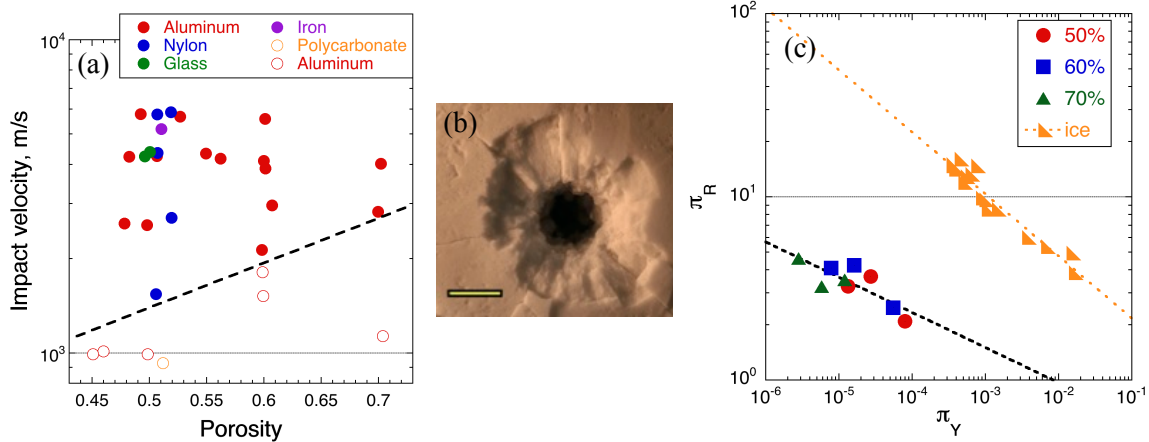


図 4 (a) 衝突溶融条件. プロットの違いは弾丸の違いを示し、塗りつぶしたプロットが溶融層が確認された条件である。点線は溶融境界を示す。(b) 空隙率 50%, アルミ弾丸 (4.3km/s) のクレーター。スケールバーは 1cm を示す。(c) π_R と π_Y の関係。ice は[6]の結果を示す。

(4) 氷・岩石混合物の変形実験

図 5a と b は純氷とシリカ氷($f=0.18$)の応力-歪み曲線である。純氷の場合、歪速度 10^{-3}s^{-1} 以下では塑性変形の特徴(歪みの増加とともに、応力が増加して最大値となり、その後低下する)が見られるが、 10^{-2}s^{-1} 以上では脆性破壊の特徴(歪みの増加とともに応力は増加するが、破壊して応力が急激に下がり 0 となる)が見られた。一方、シリカ氷($f=0.18$)の場合は、全ての歪速度において塑性変形の特徴が見られた。

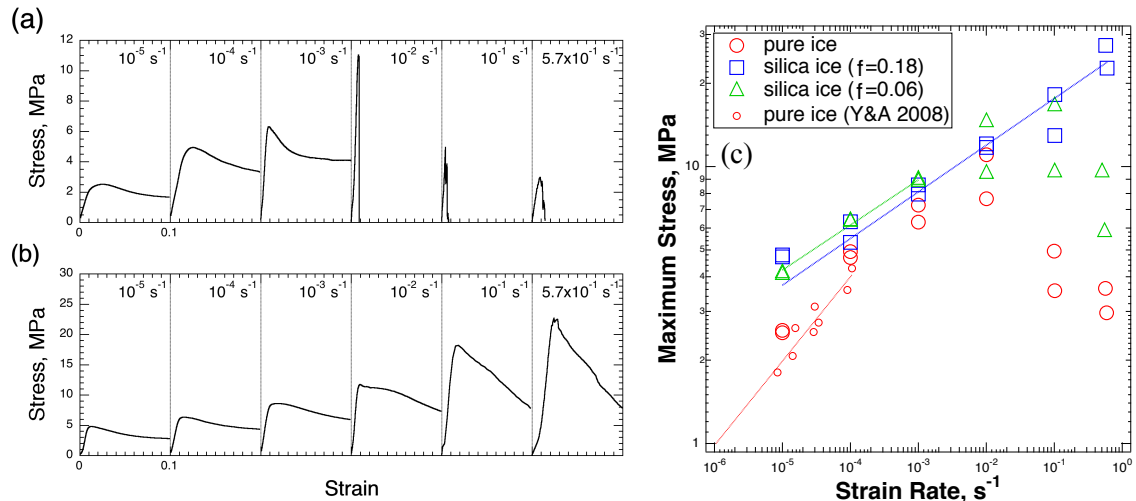


図 5 (a, b) 応力-歪み曲線の歪速度依存性。(a)が純氷、(b)がシリカ氷($f=0.18$)である。(c) 最大応力と歪速度の関係。Y&A (2008)は先行研究の純氷の結果を示す[7]。

全データの最大応力と歪速度の関係を示したのが図 5c である。この結果、塑性変形領域では歪速度と共に最大応力は指数関数的に増加した。一方、脆性破壊領域では歪速度の増加と共に最大応力が低下した。塑性変形領域では、最大応力は純氷よりシリカ氷の方が大きくなり、 $\dot{\epsilon} = B \cdot \sigma_{\max}^n$ ($\dot{\epsilon}$ は歪速度、 σ_{\max} は最大応力)を用いてフィッティングした結果、純氷に比べてシリカ氷の方が、定数 B が約 $10^9 \text{s}^{-1}(\text{MPa})^{-n}$ と約 2 桁小さくなり、ベキ n が約 6 と 2 倍大きくなった。そして、脆性・塑性境界歪速度は純氷で $10^{-3}-10^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $f=0.06$ で $10^{-3}-10^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $f=0.18$ で $6 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ 以上となり、シリカ体積含有率の増加と共に大きくなることがわかった。

【参考論文】 [1] Hartmann, *Icarus* 13, 299-301, 1970. [2] Stern et al., *Science* 350, 292-300, 2015. [3] Croft, LPS XIII abstract, 135-136, 1982. [4] Housen & Holsapple (2011), *Icarus* 211, 856-875. [5] 寫生, 博士論文, 名古屋大学, 2012. [6] Shrine et al., *Icarus* 155, 475-485, 2002. [7] Yasui & Arakawa, *GRL* 35, L12206, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. Minami Yasui, Erland M. Schulson, Carl E. Renshaw, Experimental studies on mechanical properties and ductile-to-brittle transition of ice-silica mixtures: Young's modulus, compressive strength, and fracture toughness, *J. Geophys. Res. -Solid Earth* 122, 6014-6030, 2017. (査読有り)
DOI:10.1002/2017JB014029
2. 保井みなみ, 太陽系における雪氷研究の今と将来, 日本雪氷学会学会誌「雪氷」, 79, 117-132, 2017. (査読有り)

〔学会発表〕(計 7 件) *は発表者を示す。

1. 宮野加菜*, 保井みなみ, 荒川政彦, 多孔質氷への高速度クレーター形成実験: クレーターサイズスケール則に対する衝突溶融の影響, 日本惑星科学会 2018 年度秋季講演会, 旭川市立科学館 (北海道), 2018 年 10 月 17 日-19 日 (ポスター)
2. 宮野加菜*, 保井みなみ, 荒川政彦, 多孔質氷天体上への高速度クレーター形成実験: サイズスケール則に対する衝突溶融の影響, 日本地球惑星科学連合大会 2018 年大会, 幕張メッセ (千葉県), 2018 年 5 月 20 日-24 日 (ポスター)
3. 保井みなみ*, Erland M. Schulson, Carl E. Renshaw, Daniel Iliescu, Charles P. Daghljan, 氷・シリカ混合物の塑性変形・脆性破壊遷移に関する実験的研究, 日本惑星科学会 2017 年度秋季講演会, 大阪大学, 2017 年 9 月 27 日-29 日 (ポスター)
4. 保井みなみ*, Erland M. Schulson, Carl E. Renshaw, Daniel Iliescu, Charles P. Daghljan, On ductile-to-brittle transition of ice-silica mixtures under compressive loading, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ (千葉県), 2017 年 5 月 20 日-25 日 (口頭)
5. 保井みなみ*, Erland M. Schulson, Carl E. Renshaw, Daniel Iliescu, Charles P. Daghljan, Mechanical properties of ice-silica mixtures: Fracture toughness and elastic moduli, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ (千葉県), 2017 年 5 月 20 日-25 日 (ポスター)
6. 矢部みなみ*, 荒川政彦, 保井みなみ, 多孔質氷の流動則に対する空隙の効果, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 幕張メッセ (千葉県), 2017 年 5 月 20 日-25 日 (ポスター)

〔その他〕

ホームページ等

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://epsil.sakura.ne.jp/EPSSL-Kobe/Welcome.html>)

6. 研究組織

(1) 研究協力者

- ① 高木 希 (TAKAGI, Mare), 神戸大学理学部
- ② 宮野 加菜 (MIYANO, Kana), 神戸大学大学院理学研究科
- ③ 矢部 みなみ (YABE, Minami), 神戸大学大学院理学研究科
- ④ 荒川 政彦 (ARAKAWA, Masahiko), 神戸大学大学院理学研究科
- ⑤ Erland M. Schulson, Dartmouth College (USA)
- ⑥ Carl E. Renshaw, Dartmouth College (USA)
- ⑦ Daniel Iliescu, Dartmouth College (USA)
- ⑧ Charles P. Daghljan, Dartmouth College (USA)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。