

氷・岩石混合物のレオロジーに関する実験的研究：宇宙雪氷学的応用 Experimental study on the rheology of ice-rock mixtures: Implications for cosmoglaciology

保井 みなみ^{1*}; 荒川 政彦¹YASUI, Minami^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹¹ 神戸大学大学院理学研究科¹ Graduate School of Science, Kobe University

太陽系に存在する氷天体は、その形状、密度、表面地形が多様性に富んでいる。例えば、木星以遠の氷衛星の密度は、そのサイズにより 300~3000kg/m³ と変化し、密度が小さいと残存空隙率を保持しており、密度が大きいと氷と岩石が混合していると考えられている。また氷衛星は、その成長過程において重力が増大し、天体内部の応力が構成物質の強度を超えると、塑性変形や脆性破壊を起こして、いびつ形状から重力的に最も安定な球形へと変化すると考えられている。さらに巨大氷衛星や火星極域の表層には、地球上でも見られるような氷河地形や、極めて大規模な断層地形が観測される。この様に、氷天体の密度・形状変化や表層地形のテクトニクスは、それらの構成物質のレオロジーや破壊により支配される。

氷天体の進化過程や表層地形のテクトニクスに関連したレオロジーの研究は、主に純氷を用いて行われてきた。特に純氷の流動則は、室内実験や野外観測によって、その温度依存性や結晶サイズ依存性が詳細に調べられている。しかし、実際の氷天体は氷と岩石が様々な含有率で混合し、さらに小さな氷天体には内部に空隙が残存すると考えられている。さらに氷天体の温度は、表面温度は放射平衡温度から推定できるが、内部温度は表面温度よりも高く、その温度分布はその氷天体の熱史から推測するしかない。従って、氷衛星や火星極域の進化過程及び表層地形のテクトニクスを研究するためには、氷・岩石混合物のレオロジーをできるだけ広いパラメータ範囲で調べ、その依存性を系統的に明らかにする必要がある。そこで本研究では、氷・岩石混合物の静的変形実験を行い、レオロジー特性の中でも惑星科学的に重要である流動則に対する岩石含有率、空隙率、温度依存性を系統的に調べた。

試料は、市販氷を直径 710 μ m 以下に砕いた氷粒子と直径 1 μ m のアモルファスシリカビーズを混ぜて作成した。空隙率を変化させるため、試料は 2 種類の方法で作成した。1つは真密度試料と呼び、空隙率を 0% とするために氷粒子とシリカビーズの混合粉末に水を混ぜて作成した。シリカ体積含有率は 0~0.63vol.% と変化させた。もう 1つは多孔質試料と呼び、水を使わずに氷粒子とシリカビーズの混合粉末を圧縮して作成した。シリカ質量含有率は 0, 30, 50wt.%、空隙率は 0~25% と変化させた。実験は、北海道大学低温科学研究所の低温室内に設置された変形試験機を用いて行った。温度は -10 $^{\circ}$ C から -25 $^{\circ}$ C とし、等歪速度一軸圧縮実験を歪速度 $8.7 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ から $8.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の範囲で行った。

実験では、得られる応力-歪み曲線上の最大応力 σ_{max} と歪速度 $d\epsilon/dt$ の関係から、流動則 $d\epsilon/dt = A_0 \exp(-Q/RT) \sigma_{max}^n$ を決定し、そのシリカ含有率、空隙率、温度依存性を調べた。シリカ含有率依存性については、真密度試料と多孔質試料でその依存性が異なった。真密度試料については、シリカ含有率の増加とともに最大応力が大きくなった。一方、多孔質試料については、シリカ含有率の増加とともに最大応力が小さくなった。空隙率依存性及び温度依存性については、空隙率が増加するほど、温度が上昇するほど、最大応力は小さくなった。これらの結果から、流動則のパラメータ A_0 , Q , n を求めることができる。その結果、ベキ指数 n と活性化エネルギー Q はシリカ含有率のみに依存することがわかった。ベキ指数 n は、シリカ体積含有率が 0.15 以上になると純氷 ($n=3$) の約 2 倍大きくなった。活性化エネルギー Q は、シリカ含有率の増加とともに大きくなった。一方、定数 A_0 はシリカ含有率と空隙率に依存し、 $A_0 = B \exp(\alpha\phi)$ (ϕ は空隙率、 B と α はシリカ含有率のみに依存するパラメータ) と表されることがわかった。

氷・シリカ混合物の変形モード(脆性破壊-塑性変形境界)について調べた結果、真密度試料のシリカ体積含有率が 0.29 以上になると塑性変形から脆性破壊へと変化することがわかった。またその脆性-塑性境界の温度は -20 $^{\circ}$ C で、純氷よりも 30~50 $^{\circ}$ C 高いことが分かった。最後にこの結果を用いて、氷天体(特に断層地形が観察される氷衛星)表面の変形形態を制約することができた。

キーワード: 火星極域, 氷衛星, 氷・岩石混合物, 空隙率, 流動則, 脆性破壊-塑性変形境界

Keywords: Mars polar regions, icy satellites, ice-rock mixtures, porosity, flow law, brittle-ductile boundary