

氷・シリカ混合物の脆性破壊・塑性変形遷移に関する実験的研究：宇宙雪氷学的应用

保井 みなみ¹, Erland M. Schulson², Carl E. Renshaw², Daniel Iliescu², Charles P. Daglian²

¹ 神戸大学大学院理学研究科 ² Dartmouth College

はじめに：エウロパの表面から内部海の間では、塩や酸素などの物質交換システムが機能していると言われており、その証拠が表面の断層や流動地形に発見されている。この物質交換システムが起こる成因は、氷地殻の構造に関係している。エウロパの氷地殻は、上層が冷たくて脆性的なリソスフェア、下層が暖かくて塑性的なアセノスフェアからなると言われている。そして、アセノスフェアでの固相対流と、リソスフェアでの断層形成及び開いた断層への内部海の貫入によって、物質交換が起こっていると考えられている。この固相対流と断層形成は、氷地殻を構成する物質の粘性率（流動則）と脆性破壊強度が制約する。そして、二層境界の深さを決めるのは、脆性破壊・塑性変形遷移（D/B 遷移）である。つまり、エウロパの氷地殻で起こっている物質交換システムを理解するには、氷地殻のレオロジー（粘性率、脆性破壊強度）と D/B 遷移を調べるのが重要となる。

水氷や氷・岩石混合物の流動則は、近年、詳細に明らかになってきている。一方、脆性破壊強度や D/B 遷移については、特に氷・岩石混合物に対して、研究が進んでいないのが現状である。D/B 遷移は、一定歪速度で荷重を加えた場合、物質が脆性破壊を起こし始める最小歪速度（遷移歪速度）を指す。水氷の D/B 遷移は詳細に調べられており、遷移歪速度に関する理論モデルが構築され、氷粒径、温度、封圧などの様々なパラメータに依存することがわかっている [Schulson, 1990; Renshaw & Schulson, 2001]。一方、エウロパの氷地殻のような不純物を含む氷の D/B 遷移についてはほとんど研究が行われていない。そこで本研究では、氷地殻模擬物質として氷・岩石混合物を用いた静的圧縮実験を行い、脆性破壊強度と遷移歪速度に対する岩石含有率依存性を明らかにすることを目的とした。

実験方法：試料は粒径約 200~500 μm の氷粒子と直径 0.25 μm のシリカビーズを混合して作成した。試料の空隙率を 0% に近づけるため、上記の混合物と液体の水（0 $^{\circ}\text{C}$ ）を交互に円筒形の型に入れて押し固め、低温室で凍結した。シリカ体積含有率 f は 0, 0.06, 0.18 とした。実験は、ダートマス大学セイヤー工科大学院の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 $10^{-5} \sim 0.6 \text{ s}^{-1}$ とした。温度は -10 $^{\circ}\text{C}$ である。

結果：圧縮荷重下での塑性変形と脆性破壊を区別するには、応力—歪み曲線の形状と、その曲線上の最大応力と歪速度の関係を知る必要がある。特に最大応力は、純氷の場合、塑性変形モードでは歪速度の増加とともに大きくなり、脆性破壊モードでは歪速度の増加とともに小さくなるのがわかっている。本研究での最大応力と歪速度の関係を示したのが図 1 である。このグラフから、純氷と $f = 0.06$ では先行研究と同様に、ある歪速度で最大応力がピークとなっているのが確認された。一方、

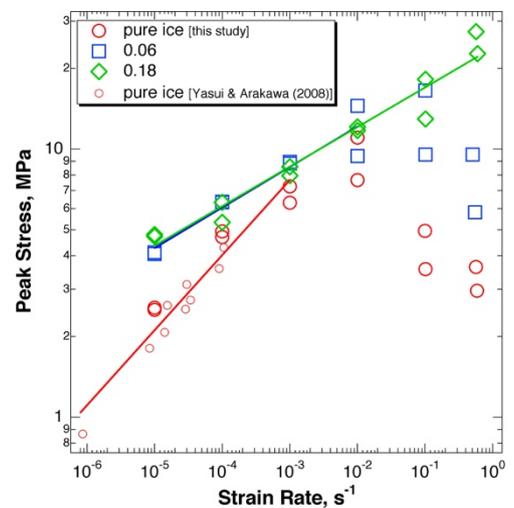


図 1：最大応力と歪速度の関係。

$f = 0.18$ では、最大応力が増加し続け、脆性破壊モードは確認されなかった。このグラフから、遷移歪速度を調べたところ、シリカ含有率が増加するほど遷移歪速度は大きくなり、純氷では 10^{-3} s^{-1} 、 $f = 0.06$ では 10^{-2} s^{-1} 、 0.18 では $>0.6 \text{ s}^{-1}$ となることがわかった。また、脆性破壊強度は脆性破壊モードでの最大応力を指し、シリカ含有率が増加するほど大きくなることがわかった。本研究の歪速度範囲では、純氷は 8-11 MPa、 $f = 0.06$ は 10-17 MPa となった。 $f = 0.18$ は脆性破壊モードが見られなかったが、歪速度が 0.6 s^{-1} 以上で脆性破壊が起こるため、20MPa 以上になると予想される。

さらに、このグラフから流動則 $\dot{\epsilon} = B \cdot \sigma_{\text{peak}}^n$ ($\dot{\epsilon}$ は歪速度、 σ_{peak} は最大応力) を調べることができる。その結果、定数 B は純氷が約 $10^{-6} [\text{s}^{-1}(\text{MPa})^{-n}]$ となり、シリカ氷 (約 $10^{-9} [\text{s}^{-1}(\text{MPa})^{-n}]$) ではほぼ一致) より 3 桁大きくなった。一方、ベキ n は純氷が 3.3、シリカ氷が 6.1~6.5 となり、シリカ含有率が大きくなると約 2 倍大きくなった。この結果は、先行研究の Yasui & Arakawa [2008] と一致した。

議論： 本研究で得られた遷移歪速度を、Yasui & Arakawa [2008] で得られた遷移歪速度と比較した結果が、図 2 である。比較した結果、本研究と先行研究は逆の結果がみられた。つまり、 $f \leq 0.18$ ではシリカ含有率の増加と共に遷移歪速度が増加するが、 $f \geq 0.29$ では遷移歪速度は減少した。これは、試料の微細構造の違いが考えられる。Yasui & Arakawa [2008] では、試料をシリカカビーズの懸濁液を凍結させて作成している。SEM 画像から、本研究の試料と Yasui & Arakawa [2008] の試料では、試料を構成する氷粒子の大きさと分布が異なることがわかった。そのため、試料の作成方法が異なると、脆性破壊を起こす原因となるクラックの大きさやその成長過程が異なることが予想された。

最後に、エウロパの氷地殻内の D/B 遷移の深さを見積もるには、遷移歪速度の温度依存性が重要となる。本研究は -10°C でしか実験を行っていないため、Yasui & Arakawa [2008] で得られている氷・シリカ混合物の遷移歪速度と温度の関係 (図 2 のピンクの線) を用いて、その傾きが本研究の結果と同じと仮定する。そして、氷地殻内部の温度分布 (熱伝導のみを考慮する) と、潮汐応力を考慮したときの推定歪速度 (約 10^{-10} s^{-1}) を用いて図 2 から求めた遷移領域の温度を比較し、D/B 遷移の深さを見積もった。その結果、氷・シリカ混合物が純氷に比べてリソスフェアが 5 倍以上厚くなることが予想された。このように、氷地殻の構成物質の違いが、リソスフェア・アセノスフェア境界や物質交換システムに大きく影響を与える可能性が示唆された。

[先行研究]

Schulson (1990), Acta Metall. Mater. 38, 1963-1976; Renshaw & Schulson (2001), Nature 412, 897-900; Yasui & Arakawa (2008), GRL 35, L12296; Arakawa & Maeno (1997), Cold Reg. Sci. Technol. 26, 215-229.

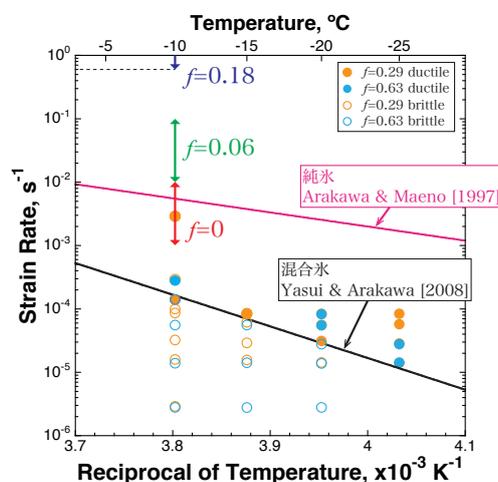


図 2 : 遷移歪速度と温度の関係。