

溶質の異なるブラインチャネルが氷の曲げ強度と弾性率に与える影響

Effects of Brine Channel Characteristics on Flexural Strength and Elastic Modulus of Ice Containing Different Solutes

佐竹 壮哉¹, 尾関 俊浩², 澤村淳司³, 安達聖⁴

Soya Satake¹, Toshihiro Ozeki², Junji Sawamura³, Satoru Adachi⁴

Corresponding author: ozeki.toshihiro@s.hokkyodai.ac.jp (T. Ozeki)

¹北海道教育大学大学院, ²北海道教育大学札幌校, ³大阪大学大学院工学研究科, ⁴防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

¹ Graduate School of Education, Hokkaido University of Education, ² Hokkaido University of Education Sapporo,

³ Graduate School of Engineering, Osaka University, ⁴ Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

本研究では海水の結氷時に閉じ込められるブラインが氷の機械的強度に与える影響を調べた。食塩水および PG 水溶液 (各 20 %・30 %) を用いて氷を作製し、片持ち梁試験で曲げ強度を測定したところ、重量ブライン率が大きいほど曲げ強度が低下する負の相関が確認され、塩水氷と PG 氷は同一直線上に分布した。X 線 CT ではブラインチャネルの角度が氷上部と中央部で異なることが示された。今回のサンプルでのブラインチャネルは細く、空間分解能 200 μm の解析ではブラインチャネルの配向に顕著な傾向は見られなかった。

1. 緒言

海水の曲げ強度は、砕氷船や海洋構造物に作用する氷荷重を評価する上で重要な力学特性である。砕氷船は海水を破壊しながら航行するが、氷の状態によっては最新の砕氷船であっても航行が困難となる場合がある。そのため、海水の力学特性を把握する氷海工学には多くの関心が寄せられている。

海水の氷結晶部分は純粋な水分子で構成されているため、氷が成長する際、塩化ナトリウムや塩化マグネシウムなどの溶存成分は未凍結の高塩分水として結晶から排除される。この高塩分水をブラインと呼ぶ。ブラインの多くはブラインチャネルを通り排出されるが、一部は氷内部に閉じ込められる。氷の破壊はクラックの伝播によって生じるため、ブライン量や内部構造が曲げ強度に影響を与えと考えられる¹⁾。

本研究では食塩を溶質とする塩水氷に加え、二価アルコールであるプロピレングリコール (以下、PG) を溶質とした PG 氷を作製した。PG は尿素とともに氷海水槽における模型試験で用いられることが多い溶質である。PG は有機溶質であり、塩化ナトリウムとは異なる性質を有することから、ブラインの 3 次元構造に差異が生じる可能性がある。そこで本研究では、塩水氷および PG 氷について片持ち梁試験を行い、曲げ強度および内部構造の比較を行った。

2. 塩水氷と PG 氷の低温室内成長実験

本研究は北海道教育大学札幌校低温室において実施した。室温 -20 $^{\circ}\text{C}$ の低温室内にアクリル水槽を設置し、塩化ナトリウム水溶液または PG 水溶液を投入した。そして、水槽の下面と側面を断熱材で囲い、上面から凍結させることで厚さ 3 cm 程度の平坦氷を作製した。溶液濃度は 20 % および 30 % に調整した。なお、氷表面には seeding を施し、均一な氷板形成を行った。生成した氷板からは長さ約 16 cm、幅約 6 cm のコの字型供試体を切り出し、片持ち梁試験を実施した (図 1)。供試体先端に荷重を加え、破壊時の最大荷重および供試体寸法から曲げ強度を算出した。また、氷の比重および内部温度を測定し、重量ブライン率を求めた。さらに、超音波非破壊試験機 UST (Ultrasonic Tester) を用い、超音波パルス法により氷梁の弾性率を求めた。

供試体内部のブラインの 3 次元構造を観察するため、X 線 CT 撮像を行った。撮像後の画像データは画像解析ソフト Fiji を用いて二値化および孤立点除去を行い、ブラインチャネルの形状および配向性について解析した。

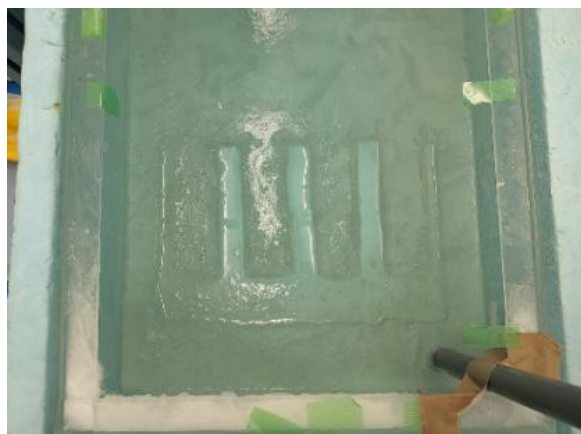


図1 氷板から切り出した氷梁

3. 実験結果

3. 1 曲げ強度試験結果

本研究では氷梁が等方性をもち、均質な弾性梁であると仮定し、空中における片持ち梁理論を適用した。片持ち梁の先端に加重を加えていき、破壊した際の荷重 F を測定した後、自由端から破壊箇所までの距離 L 、梁の幅 b 、厚さ h を物差しで計測した。このときの曲げ強度 σ_f を以下の式を用いて計算した。 M は曲げモーメント、 Z は長方形の断面係数を表す。

$$\sigma_f = \frac{M}{Z} = \frac{FL}{bh^2} = \frac{6FL}{bh^2} \quad (1)$$

表1に各条件における氷の曲げ強度を求めた結果を示す。各水準間で t 検定を行った結果、同一溶質内においては、塩水氷 20% と 30% の間に有意差が見られたが ($p < 0.01$)、PG 氷 20% と 30% の間には有意差は見られなかった ($p =$

0.774)。一方、同一濃度内においては、20% 条件で有意差は見られなかったが ($p = 0.357$)、30% 条件で有意差が見られた ($p = 0.01$)。ただし、塩水氷 30% のみ seeding を施しておらず、seeding の有無が原因で有意差が出ている可能性が非常に高い。

3. 2 曲げ強度と重量ブライン率の関係

重量ブライン率とは、試料中に含まれるブラインの割合を質量比で表した指標である。重量ブライン率は、カロリメータ法による秋田谷式含水率計を用いた推定式を、塩分を含む積雪の重量ブライン率測定用に改良した式²⁾を用いて算出した。

図2に重量ブライン率と曲げ強度の関係を示す。点数は少ないものの PG 氷の重量ブライン率は塩水氷と比較して数ポイント小さいという結果となった。また、同条件で実験を行った竹村 (2024)³⁾ のデータも含めて回帰曲線を作成した結果、曲げ強度と重量ブライン率には負の相関が見られた ($R^2 = 0.739$)。ただし、塩水氷 30% のデータは seeding を施していないため除外している。

表1 各条件における氷梁の曲げ強度

	塩水氷 20 %	塩水氷 30 %	PG 氷 20 %	PG 氷 30 %
平均値 / kPa	65.6	137.1	71.1	73.3
標準偏差	20.1	71.9	6.3	18.1
試行回数	16	13	6	8

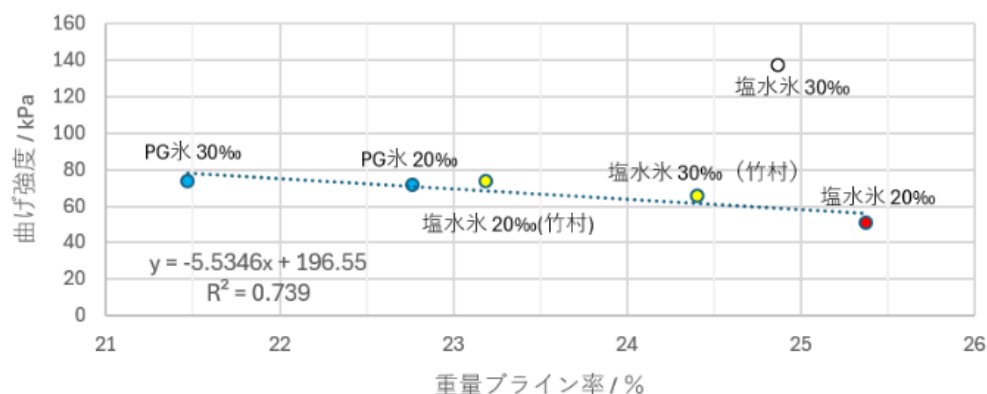


図2 曲げ強度と重量ブライン率の関係

3. 3 弾性率測定結果

本研究では超音波非破壊試験機で氷梁の厚み方向に超音波を与えることで弾性率を測定した。測定して得られる伝播時間 T_p と氷梁の厚み h から、超音波の伝播速度 V_p は

$$V_p = \frac{h}{T_p} \quad (2)$$

と求められる。このとき弾性率 E はポアソン比 μ を用いて、次の式で求められる。

$$E = \rho V_p^2 (1 - \mu^2) \quad (3)$$

試験機の都合上、ポアソン比 μ は求められないため、本実験では次の近似式で求めた。

$$E \approx \rho V_p^2 \quad (4)$$

表 2 に各条件における弾性率を測定した結果を示す。各水準間で t 検定を行った結果、同一溶質内においては、塩水氷 20 % と 30 % の間に有意差が認められず ($p = 0.963$)、PG 氷 20 % と 30 % の間にも有意差は認められなかった ($p = 0.081$)。同一濃度内においては、20 % 条件で有意差は認められ ($p = 0.039$)、30 % 条件では有意差が認められなかった ($p = 0.848$)。

	塩水氷 20 %	塩水氷 30 %	PG 氷 20 %	PG 氷 30 %
平均値/ GPa	4.57	4.54	3.89	4.68
標準偏差	1.01	1.14	0.85	0.53
試行回数	34	4	12	4

3. 4 試料中の溶質質量の比較

表 3 に各条件における試料中の溶質質量を求めた結果を示す。各水準間で t 検定を行った結果、同一溶質内においては、塩水氷 20 % と 30 % の間に有意差が見られず ($p = 0.234$)、PG 氷 20 % と 30 % の間には有意傾向が見られた ($p = 0.097$)。同一濃度内においては、20 % 条件で有意差が見られ ($p < 0.01$)、30 % 条件でも有意差が見られた ($p < 0.01$)。PG は食塩と比べて、ブラインとして氷内部に閉じ込められにくいという結果となった。

表 3 各条件における試料中の溶質質量

	塩水氷 20 %	塩水氷 30 %	PG 氷 20 %	PG 氷 30 %
平均値/ g	0.48	0.58	0.024	0.091
標準偏差	0.09	0.14	0.03	0.04
試行回数	6	6	6	3

4. X 線 CT による解析結果

図 3 に塩水氷サンプル内部の X 線 CT 画像を示す。空間分解能を 20, 40, 100, 200 μm としたときのブラインチャンネル構造を比較した。空隙には造影のために臭化ドデシルを注入した⁴⁾。ブラインが残存しているブラインチャンネルには臭化ドデシルは浸透せず、氷とのコントラスト差は小さいが、本研究では氷とブラインの間で閾値を決定した。分解能が高い 20, 40 μm では中央部において鉛直方向へ伸びるチャンネル構造が確認できる。一方で、分解能を低くすると、チャンネルの縦構造は分断されて不明瞭となり、200 μm では全体として塊状の分布となることが確認できる。

図 4 に空間分解能 200 μm で撮像した塩水氷 30 % の画像を画像解析ソフト Fiji に読み込み、孤立点を除去した結果を示す。ブラインチャンネルはサンプル上部で水平方向を向き、それより下では縦構造が見える。

図 5 に塩水氷 30 %、図 6 に PG 氷 30 % のブラインチャンネル角度分布を示す。青棒はサンプル上部、オレンジ棒は中央部である。塩水氷においては、上部では水平に近い角度のブラインチャンネルが多い一方、中央部では角度のばらつきが大きく、配向性は見られなかった。一方、PG 氷においては、上部中央部ともに水平に近いブラインチャンネルが多く確認できる。両試料ともに鉛直方向のブラインチャンネルは見られなかった。

高分解能画像では鉛直方向に連続するチャンネル構造が確認された。一方、本研究で用いた 200 μm の分解能では、鉛直方向のチャンネルを確認できず、ブラインチャンネルの微細構造を十分に反映できていない可能性がある。より高い分解能で解析することで、ブラインチャンネルの配向性や連結性などの構造的特徴が反映される可能性がある。ただし、各分解能で体積分布に大きな差異は見られなかった。したがって、曲げ強度に影響を及ぼす主要因が、ブラインチャンネルの形状や配向性ではなく、ブライン量そのものにある可能性が示唆された。すなわち、重量ブライン率

などで評価する場合には、本研究で採用した 200 μm 程度の分解能でも十分に特徴を捉えられる可能性がある。今後は、高分解能画像を用いた構造解析を行い、ブラインチャンネルの形状・連結性と曲げ強度との関係を詳細に検討する必要がある。

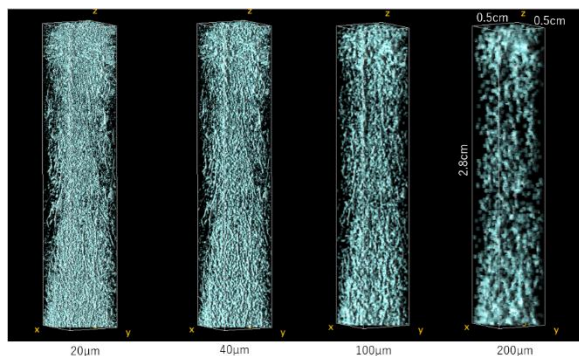


図3 塩水氷 30 %のサンプルの X 線 CT 画像

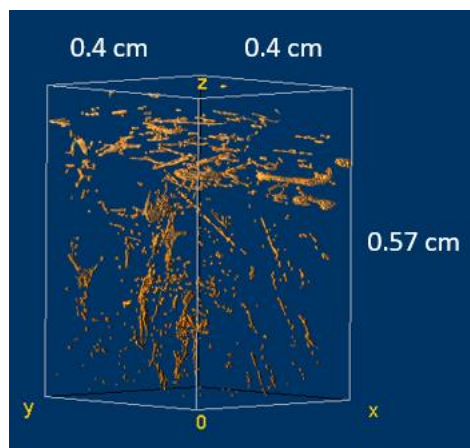


図4 塩水氷 30 %の X 線 CT 画像（空間分解能 200 μm ）を Fiji で編集した図

5. まとめ

本研究では、塩水氷と有機物を溶質とした氷との内部構造の比較を行い、曲げ強度に影響を与える要因について調べるために種々の実験を行った。さらに、X 線 CT を用いて塩水氷および PG 氷内部のブライン構造を可視化し、ブラインチャンネルの配向性について比較した。

曲げ強度試験の結果、塩水氷、PG 氷ともに、重量ブライン率の増加に伴い、曲げ強度が低下する傾向が見られた。X 線 CT によるブラインチャンネルの構造解析を行った結果、空間分解能 200 μm では、氷の上部と中央部で顕著な差は見られず、鉛直方向のチャンネルは確認できなかった。

水平面に対する角度の相対度数

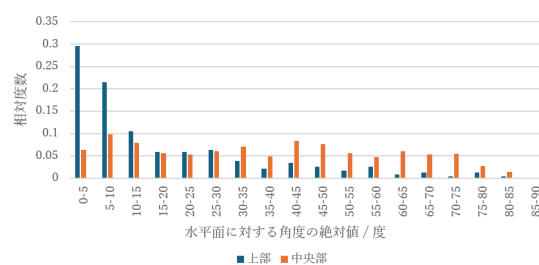


図5 水平面に対するチャンネルの角度とその相対度数（塩水氷 30 % 上部，中央部）

水平面に対する角度の相対度数

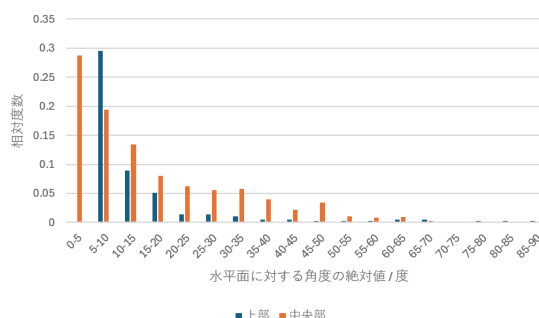


図6 水平面に対するチャンネルの角度とその相対度数（PG 氷 30 % 上部，中央部）

【参考文献】

- 1) 尾関俊浩, 折目啓輔, 安達聖, 澤村淳司 (2022) : 海氷の微子構造と曲げ強度の関係—塩水氷作成時の Seeding がブライン分布と曲げ強度に与える影響の実験的考察—. 日本船舶海洋工学会講演会論文集, **35**, 137-140.
- 2) 木村宏海, 八久保晶弘, 舘山一孝, 谷川朋範, 小嶋真輔 (2021) : 塩を含む含水率測定法. 日本雪氷学会誌 雪氷, **83**, 579-590.
- 3) 竹村洋人 (2024) : 塩水氷および尿素水氷の曲げ強度に違いを与える要因に関する実験的研究. 北海道教育大学札幌校学士論文.
- 4) S. Adachi, S. Yamaguchi, T. Ozeki, H. Ohno, A. Hachikubo, Y. Iizuka, and A. Miyamoto (2024) : New method of fixing snow samples in the field for X-ray CT imaging using 1-bromododecane. *Proc. Int. Snow Sci. Workshop (ISSW)*, 493-496.