

塩水を用いた湿潤着氷のブライン排水路の再現実験

坂本拓麻（北海道教育大学大学院 札幌・岩見沢校），
尾関俊浩（北海道教育大学札幌校）

1 目的

オホーツク海北部及び日本海北部の海域を厳冬期に航行する船舶には、しばしば着氷が発達することが知られている。船体着氷の源は海水の飛沫であることから、着氷内にブラインが含まれており、形成時には含水量の多さからスポンジ・アイスと呼ばれる¹⁾。日本海北部の防波堤灯台にも厳冬期に着氷が発達するが、その形成過程から海水飛沫による着氷がその主な原因と思われる。本研究では海水飛沫着氷内のブラインに着目し、そのネットワーク構造を調べるため、 -5°C の低温室内で海水飛沫着氷を模擬した湿潤着氷試料を作製し、さらに低温室用小型MRIを用いて着氷内のブラインの撮像を行うことを目的とした。

2 実験装置と実験方法

-5°C の低温実験室内で、流量制御定量ポンプを用いて、樋上に供給水を流し、流下液膜を再現することで湿潤着氷を再現した。供給水には水に食塩(NaCl 99 %以上)を加え濃度 30 ‰の塩水とし、MRIの造影剤として硫酸銅を 0.005 mol/l 加えた。

実験装置の概要図を図1に示す。まず、貯水槽の中に蓄えられた供給水をホースとポンプにより吸い上げ、樋に供給する。ホースには途中での凍結を防止するために線ヒータを設置した。自然界の海水飛沫は発生が間欠的であることから、本装置でも流下液膜の供給量と供給間隔が調整できるようにした。供給量は流量計を用いて測定した。樋は横幅が 12 cm、深さ 5 cm ものを使用した。貯水槽にはサイズ縦 48 cm、横 28 cm、高さ 32 cmのペルチェ電子冷温式冷温蔵庫を用い、 -5°C の低温室内でも供給水が凍結しないように温度調節した。これにより、供給水の水温を約 -1.5°C に保つことができた。

3 実験結果

3.1 鉛直樋での塩水着氷実験

図2のように二つの樋を、上段樋は仰角 10° 度、下段樋は鉛直に設置した。樋の長さは上段が 160 cm、下段が 65 cm である。上段樋に供給水を流すことにより、供給時に約 $+1.5^{\circ}\text{C}$ であった塩水を上段樋の下端部で、約 -3.0°C まで下げることができ、下段樋上に着氷を発生させることができた。実験時間は 20 時間、流した供給水は 10 リットルである。

図3は下段樋に成長した着氷の写真である。湿潤着氷²⁾を再

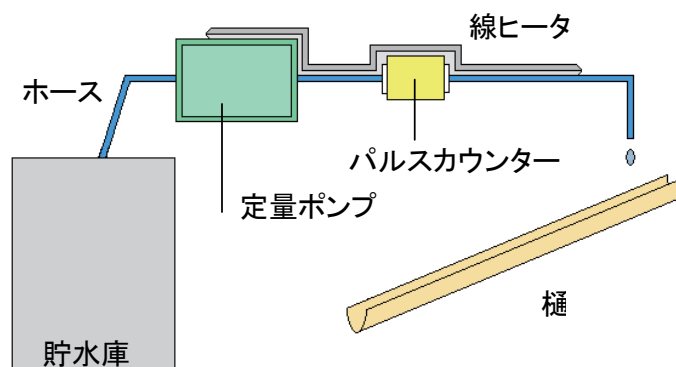


図1 実験装置の概要図

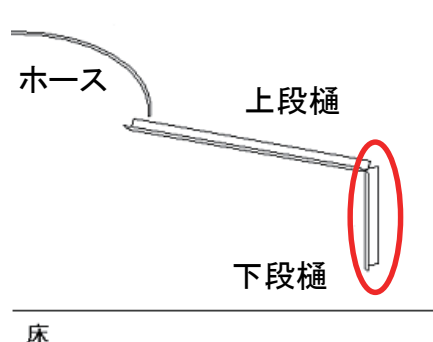


図2 鉛直樋(下段樋)への着氷実験の装置概念図

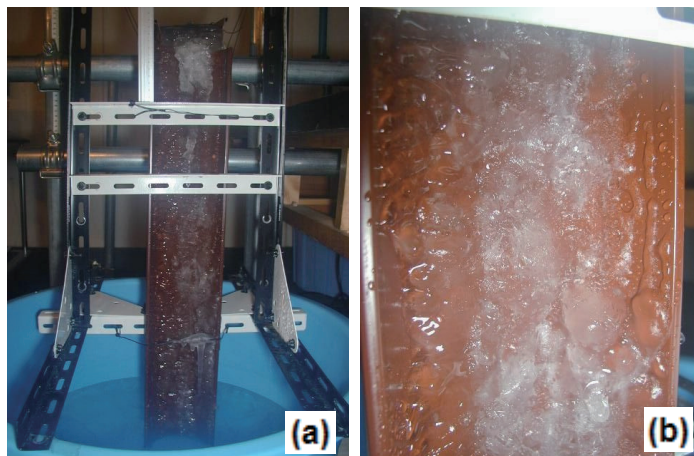


図3 着氷の写真. 写真(a): 下段樋全体の写真.
写真(b): 写真(a)を一部拡大したもの.

現したため、着氷表面は濡れていた。また表面には凹凸が形成された。

上段樋の上部での塩分濃度は 30 %だったが、下段樋の中間部分で流下液膜を採取して測定したところ、塩分濃度は 60 %であった。したがって純水が凍結することにより流下液膜の塩分濃度が高くなったことが確かめられた。

3.2 塩水つららの形成実験

図4のように樋を一つだけ使用し、樋の先端部に塩水つららを作成した。樋の長さは 160 cm, 仰角 10 度に設置した。樋の下端での水温を約 -3.0°C に調節した。実験時間は 20 時間, 流した供給水は 10 リットルである。

図5は樋先端部に成長した塩水つららの写真である。湿潤着氷であり、表面には凹凸が形成された。また一般の真水のつららに比べ、白濁していた。

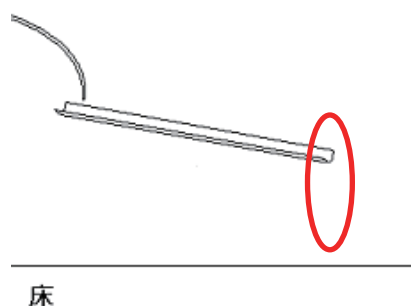


図4 塩水つららの作成装置概念図

4 MRI によるブラインの撮像

4.1 MRI 装置

ブラインの撮像には 1 T の永久磁石を用いた小型低温室用 MRI 装置を用いた³⁾。サンプルホルダの形状は内径 24 mm, 長さ 100 mm の円筒形である。空間分解能は $200\ \mu\text{m}$, イメージマトリックスは $128 \times 128 \times 128$ である。この MRI 装置では、氷粒子からの信号はノイズレベル以下と微弱なため可視化できない。そのため着氷内部のブラインのみを可視化することができ、ブラインの分布を観察することができる⁴

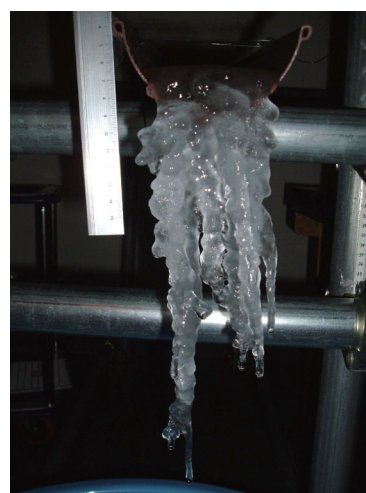


図5 作成した塩水つららの写

4.2 MRI で可視化したブライン

図 6 は樋上に作成した湿潤着氷内部のブラインを MRI によって可視化したものである。MIP (最大値投影法) による画像であり、全 128 層分の 2 次元画像を投影し、奥行きの情報まで見ることができる。

図 7 は樋先端部に作成した塩水つららのブラインを MRI によって可視化したものである。この画像も MIP 表示である。ブラインが着氷内部全体に分布し、輪郭がブラインによって波模様に形成されていることから、つららの表面の波模様がブラインによって確認できる。

図 8 は 2008 年 2 月 26 日に初山別村豊岬で防波堤灯台に着氷した海水飛沫着氷を採取し、MRI で可視化した画像である。着氷内部のブラインは採取した時にはすでに排水されていたので、代わりに造影剤 (ドデカン) を着氷内部に満たして撮像した。

作成した湿潤着氷のブラインの分布 (図 6, 7) と自然の海水飛沫着氷のブラインの分布 (図 8) を比較すると、いずれも着氷内部全体にブラインがあり、細長い紐のようなブラインがいくつか共通して観察することができ、それらの太さもほぼ同じであったことから、作成した湿潤着氷は自然の海水飛沫着氷に近い内部構造を再現できていると思われる。

5 温度変化がブラインの分布に与える影響の調査

自然の海水飛沫着氷は時間の経過とともに、着氷内部のブラインが排出されることが知られている。この駆動力は第 1 に重力、第 2 に相変化による体積変化がある。また、自然の着氷を採取した場合、低温室へ移動させる間の温度変化がブライン分布に与える影響を調査し、線プルの妥当性を判断する必要がある。本研究では、低温室で作成した塩水湿潤着氷に -20°C と -5°C の温度のサイクルを与えて、ブラインの分布に変化があるかを MR 画像により観察した。

5.1 実験方法

塩水湿潤着氷を -20°C の低温実験室内で 12 時間以上置き、サンプル全体を -20°C に冷却した。次に -5°C の低温実験室内でさらに 12 時間以上置き、全体を -5°C に戻したのち MRI 装置を用いて、ブラインの撮像を行った。この一連の作業を 1 サイクルとし、同じサンプルにつ

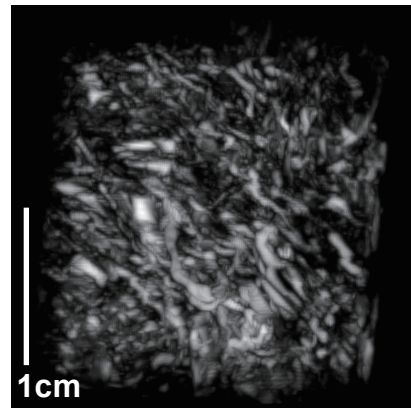


図 6 樋上に作成した着氷の MRI 画像。白く表示されている部分が着氷内部のブライン。

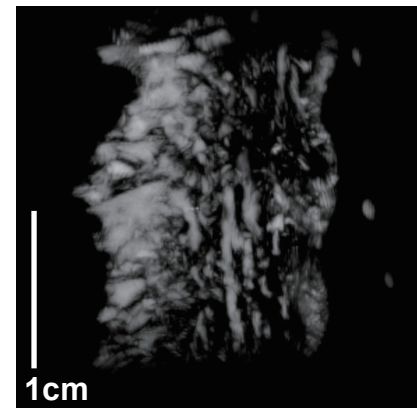


図 7 塩水つららの MRI 画像。画像の上下方向はつららの上下方向と同じ。

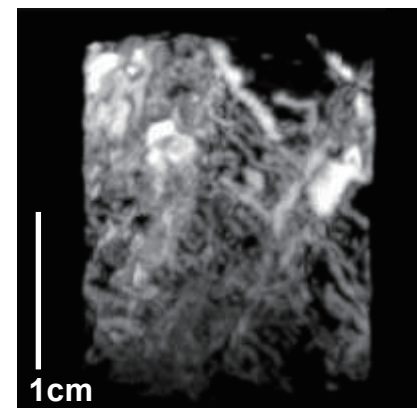


図 8 豊崎南防波堤灯台の着氷の MRI 画像。着氷内部の空隙に造影剤を満たして、ブラインの分布を可視化した。

いて 10 サイクル繰り返し、それぞれの 3 次元データからブラインの様子を観察し、元の画像と比較した。各回のサンプルの向きは同方向にそろえた。

5.2 実験結果

それぞれ得られた 3 次元データはイメージマトリックス 128×128 の 2 次元画像 128 スライスから成る。今回はその内の比較の見やすかった 66 番目のスライスを 1 つだけ取り出し、2 次元画像で比較した (図 9)。各サイクルでの変化は撮像する際の調整誤差程度にしか見られなかった。さらに、サンプル作製から約 50 日間経過した撮像ですら変化が見られなかったことから、通常の時間の経過によるブラインの排水もないと考えられる。

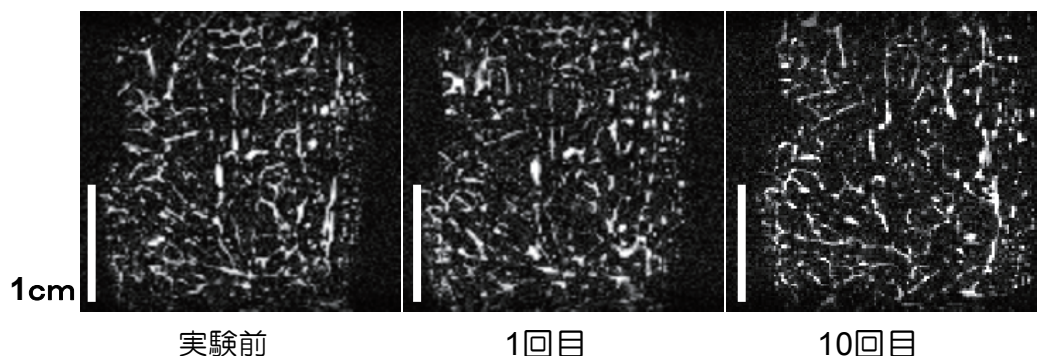


図9 MRIによる着氷の断面のブラインの可視化。左からサイクル実験前, 1 サイクル目, 10 サイクル

6 まとめ

今回の実験により、着氷内部にブラインを含む湿潤着氷の再現ができたことを MRI により確認した。自然の海水飛沫着氷と同様にブラインを着氷内部全体に分布させることができたが、それぞれのネットワークが形成されているかどうかを確認することができなかった。今後は、低温実験室での海水飛沫着氷の再現性の向上及び、本実験で作製した海水飛沫着氷を再現した試料に加え、自然の海水飛沫着氷の試料から 3 次元データを取得し、3 次元解析ソフトにより、海水飛沫着氷のブライン排水路の定量化と成長機構を解明することを目指す。

7 謝辞

本研究を進めるにあたり、本学物理研究室の油川英明教授には、ご多忙の中、実験の内容から論文製作にいたるまで丁寧な指導や助言を頂いた。北海道大学低温科学研究所の河村俊行博士からも重要なご助言を頂いた。また、筑波大学大学院生の安達聖氏には、実験装置の使い方の指導や助言を頂いた。ここに併記して深く感謝の意を表する。

8 参考文献

- 安達聖, 尾関俊浩, 拝師智之 2006: 低温室用コンパクト MRI による海水飛沫着氷ブライン排水路の可視化, 寒地技術論文・報告集, 22, 86-89.
- Lasse Makkonen 2000: Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures, Phil Trans R Soc Lond, A358, 2811-2845.
- 小野延雄 1964: 船体着氷に関する研究 II: 着氷条件と着氷量について, 低温科学, 22, 170-181.
- 尾関俊浩, 巨瀬勝美, 松田善正, 拝師智之, 中坪俊一 2003: MRI による海水飛沫着氷内のブラインチャンネルの可視化, 寒地技術論文・報告集, 19, 239-243.