

海氷タンクにおけるフロストフラワー生成実験

Frost flower formation experiment in a sea ice tank

中山 雅茂¹, 的場 澄人²

Masashige Nakayama¹, Sumito Matoba²

Corresponding author: Nakayama.masashige@k.hokkyodai.ac.jp (M. Nakayama)

Frost flowers, which can grow on thin sea ice surfaces at low temperatures, have attracted considerable attention. Therefore, to repeat experiments involving frost flowers, we conducted a simple experiment to confirm whether a sea ice tank developed for outdoor experiments can also produce frost flowers. The results suggest that frost flowers can be grown by suppressing the strong seepage of brine caused by the internal pressure that occurs when sea ice is grown in a closed space, such as a water tank.

1. はじめに

薄い湖水や海氷の表面に霜が成長したフロストフラワー（霜の華）が出現することが知られている。海氷上のフロストフラワーは、海氷表面にしみ上がる表面ブラインの影響を受け、大気への化学物質放出との関わりがある（Kaleschke *et al.*, 2004; 的場ら, 2014; Hara *et al.*, 2017）。この海氷上に成長するフロストフラワーを水槽内で再現する室内実験も行われている（Martin *et al.*, 1995; Style *et al.*, 2009; Roscoe *et al.*, 2011; 船橋ら, 2020）。

本研究では、海氷のマイクロ波放射特性の観測実験を行うために開発された海氷タンク（Nakayama *et al.*, 2024）をベースに光学測定用に改良した小型の海氷タンクを用いて、このタンクでフロストフラワーの再現が可能か試験的な実験を行った。フロストフラワーの再現が可能であれば、海氷上にフロストフラワーが存在する場合の光学やマイクロ波放射特性を観測することができ衛星データの解釈に役立つ。

2. 実験装置

今回の実験に使用した海氷タンクは、直径 135 cm × 高さ 70 cm の円柱状で光学測定のため内壁と底面に黒色フェルトを張り付けたものである。ここに近隣漁港で採水した 30.7psu の海水を満たし、屋根部に組み込まれた冷却器の温度設定を -20℃ にして海水を表面から冷却した。冷却器から吹き出す冷風が表面に直接当たらないようにするため、アルミシートを張り付けた断熱材を設置した。

実験時のタンクの外観を写真 1 に示す。タンク内には氷厚を推定するため、サーミスタを垂直方向 1 cm 毎に配置した温度プロファイル計と、海氷表面近くの温度と湿度を測定するため携帯型気象計を設置した（写真 2）。加えて、海氷表面の変化を撮影するためにデジタルビデオカメラ（SONY FDR-X3000）と LED 照明を設置し、30



写真 1 海氷タンクに海水を満たした状態



写真 2 温度プロファイル計と携帯型気象計
秒毎に静止画像として記録した。

¹ 北海道教育大学 釧路校

² 北海道大学 低温科学研究所

Kushiro Campus, Hokkaido University of Education
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

なお、事前に行った実験によって今回の冷却器の温度設定では、タンクとその内壁に張り付けたフェルトを含め外周の結氷速度がタンク中央部よりも速く、フリーボードが維持されないことがわかっていた。そのため、海氷の成長に伴いタンクの内圧が高まり、海氷表面へブラインのしみ上りが多くなることが予想された。そこで、海氷の成長途中でタンク内の海水を抜くことで内圧を下げ、ブラインのしみ上り量を軽減することを計画し実験に取り掛かった。

3. 実験結果

2024年3月27日19時に開放水面の状態から冷却をはじめ、約2日間半にわたって実験を行った。図1は、写真2に示す温度プロファイル計によって得られた水面上1cmの気温および水面と水深1cm毎の温度の変化である。水面上1cm (air1cm) と水面 (0cm) を除いて、水深1cm以下の温度を見ると、実験開始時からほぼ同じ傾向で低くなるとともに、ある時刻よりさらに温度が低下している様子が確認できる(図1中の↓の時刻)。例えば、水深1cmは3/28 4:26、水深2cmは同 7:46 より、その水深より深い層での温度よりも低い値を記録していることがわかる。これは、測定している深さの海水が結氷温度に達した後、

サーミスタの周囲が完全に結氷したことでさらに温度が低下した結果である。この温度の変化点を指標に、タンク内の海氷の氷厚の変化を推定した。その結果を図2に示す。ここから約2日間で厚さ10cmほどに海氷が成長していることがわかる。

実験期間中、フロストフラワーの有無と海氷の表面状態を直接目視で確認するため、3/28 10:50 (推定氷厚3.0cm) と同日 20:35 (推定氷厚5.7cm) に冷却器が組み込まれている屋根部を開けた。いずれの時もフロストフラワーは確認されず、海氷表面にブラインと思われるしみ上がりが確認された。そこで、タンク下部より伸びる排水用ホース部より、11:00 に約1L、20:52 に約10Lの海水を抜き出すことで、しみ上りの軽減を図った。

実験終了後、デジタルビデオカメラによって30秒毎に撮影した静止画像を確認した。その結果、フロストフラワーと思われる霜が海氷表面から成長する様子が2度にわたって確認できた。まず初めに確認されたのが3/28 12:46(30s)から同16:20にかけてである。次に確認されたのが3/28 23:05(30s)から3/29 4:00にかけてである。各イベント時における推定氷厚を表1に、フロストフラワーが確認された静止画像を写真3に示す。

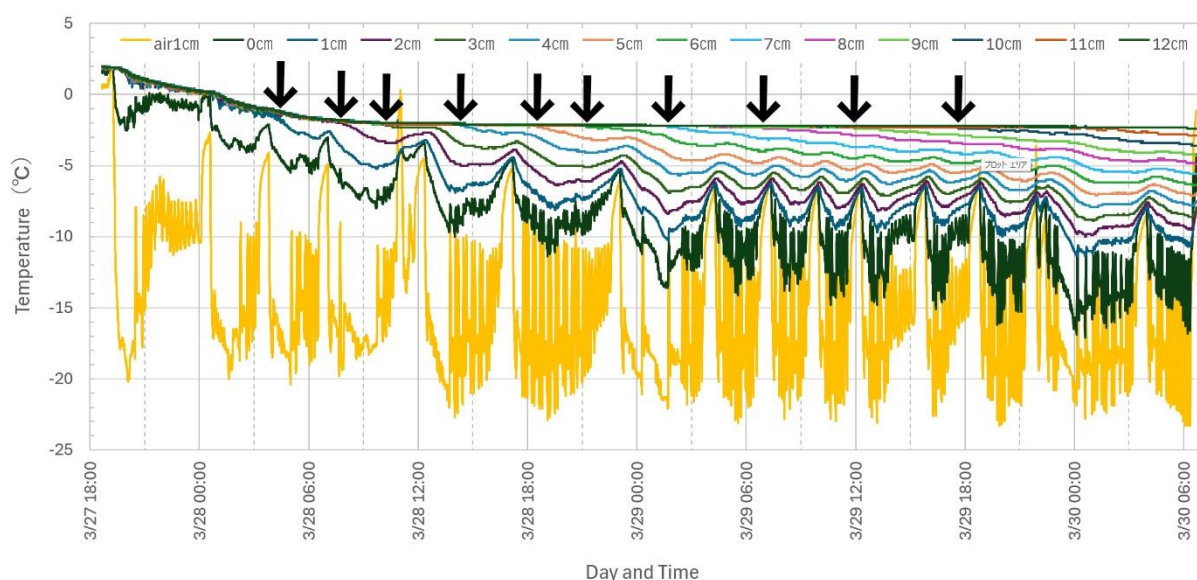


図1 実験期間中における各深さの温度の時系列変化

図中の矢印(↓)は、ある深さの温度が他に比べ低下し始める部分を示す。この時、この温度の変化があった深さまで海水が海氷になったと判断した。

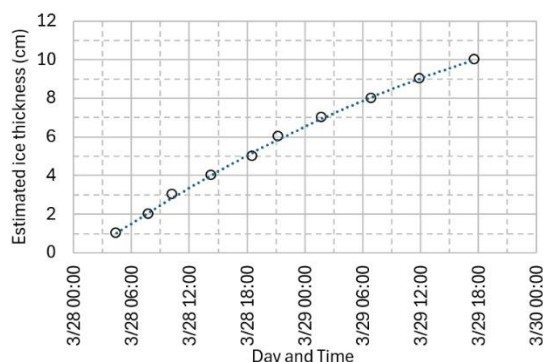


図2 深さ 1 cm ごとの温度データから推定された氷厚の時系列変化

表1 各イベントの時刻と推定氷厚

Day and Time	Event Details	Estimated Ice Thickness(cm)
3/28 11:00	Drain 1L of seawater.	3.1
3/28 15:12	White lumps resembling early frost flowers are observed.	4.3
3/28 20:52	Drain 10L of seawater.	5.8
3/29 3:00	Frost flowers grow clearly	7.2

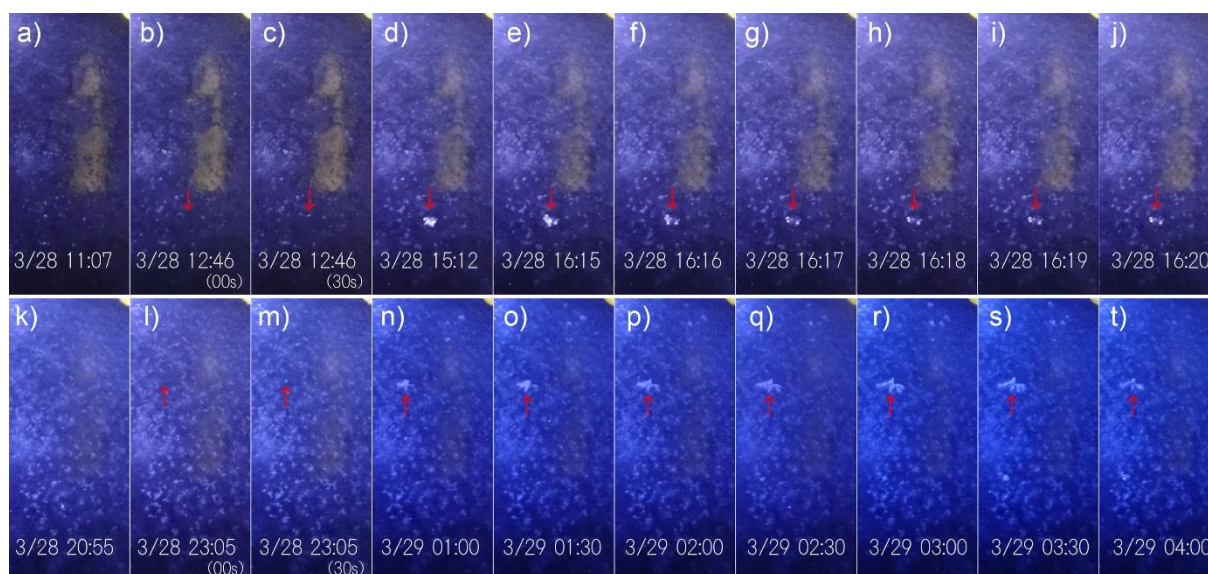


写真3 フロストフラワーが確認された静止画像

a～j においては，c でフロストフラワーの起点が確認できた．k～t においては，m でフロストフラワーの起点が確認できた．

4. 考察

写真3 上段の a～j は，タンク内の海水 1L を抜いた後で確認できたフロストフラワー 1 の初期の変化をとらえている．この期間における海水表面およびその上下 1 cm の温度変化を図 3 に示す．写真 3 b の矢印先端部分はグレー色であるが，30 秒後に撮影された同 c では白い点を確認できたことから，ここがフロストフラワー 1 の起点と考えられる．この時，海水表面上 1 cm の温度（図 3 “air1cm”）を確認すると，冷却器の霜取りが終了し冷却が始まり，継続して -15°C 以下が保たれている．その後，霜が成長し約 2 時間 30 分後に最も大きくなった（写真 3 d）．さらに時刻を進めると，成長した霜のかたまりの中央部分が白色からグレー色に変わっていく様子が確認できる（写真 3 e～j）．この時，海水表面上 1 cm の温度の下限が -15°C を下回らなくなっている．

次に，写真3 下段の k～t を見る．この期間における海水表面およびその上下 1 cm の温度変化を図 4 に示す．写真 3 k は，タンク内の海水を 10L 抜いた後の状態である．図 4 より，k～l の間，海水表面上 1 cm の温度（図 4 “air1cm”）が -15°C 以下と -10°C 程度の値を繰り返しているが，フロストフラワー 2 の起点は写真 3 k～l の間に撮影された画像からは確認できなかった．その後，冷却器の霜取りが終了し，再度冷却が始まる直前と思われるタイミングで，写真 3 m の矢印先端部分に白い点を確認できた．その後，少しずつ霜が成長し，図 4 q～s あたりで最も大きくなり，その後は徐々に小さくなった．3/29 9:00 頃になると画像上でこのフロストフラワー 2 は確認できなくなった．

ここで，タンク内の海水を 1L および 10L 抜いた時の状況について考える．タンク直径が 135 cm

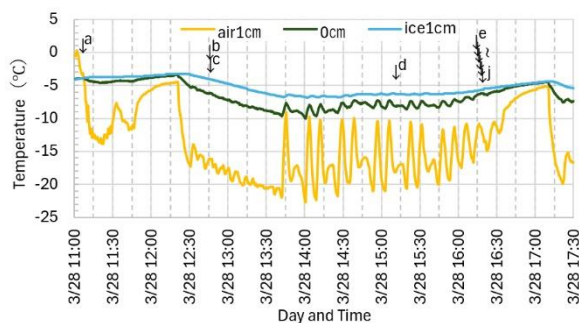


図3 フロストフラワー1が確認された期間における温度の時系列変化

図中a～jの↓は、写真3の各画像a～jが撮影された時刻に対応する。

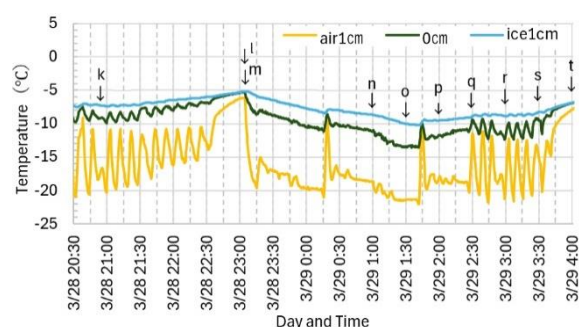


図4 フロストフラワー2が確認された期間における温度の時系列変化

図中k～tの↓は、写真3の各画像k～tが撮影された時刻に対応する。

であることから、海水 1L は水深約 0.7 mm, 同 10L は約 7 mm に相当する。海水 1L を抜いた時の推定海氷厚は 3.1 cm, 10L を抜いた時は 5.8 cm である。海氷厚に対するタンク内の海水を抜くことによって低下する水位の割合（低下する水位/海氷厚）を求めると、それぞれ、海水 1L を抜いた時は約 2.3%, 海水 10L を抜いた時は 12% となる。海氷の密度は、ブラインや気泡の量に加え氷温によっても変化することから、どの程度の海水を抜くことが妥当であったかを議論するのは難しいが、海氷表面へのブラインのしみ上りを軽減した後にフロストフラワーが成長することが確認できた。

5. おわりに

今回の実験結果から、海氷の成長に伴って高まる内圧を随時開放する機構を加えるか、もしくは、海氷が外周に固着せずフリーボードが維持されるように成長させることで、本実験で用いた海氷タンクでもフロストフラワーを成長させられる見込みがあることを確認できた。今後は、今回の実

験で得られた成果をもとに海氷タンクの改良を行う計画である。

【謝辞】

本研究では JAXA/GCOM-W に関する受託研究で設置した実験設備を利用させていただいた。関係各位に厚くお礼申し上げる。

【参考文献】

- 1) Kaleschke, L., A. Richter, J. Burrows, O. Afe, G. Heygster, J. Notholt, A. M. Rankin, H. K. Roscoe, J. Hollwedel, T. Wagner and H. W. Jacobi, 2004: Frost flowers on sea ice as a source of sea salt and their influence on tropospheric halogen chemistry. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/2004GL020655.
- 2) 的場澄人, 原圭一郎, 山崎哲秀, 2014: グリーンランド北西部でのフロストフラワーの観測, 雪氷研究大会, P2-33.
- 3) Hara, K., S. Matoba, M. Hirabayashi and T. Yamasaki, 2017: Frost flowers and sea-salt aerosols over seasonal sea-ice areas in northwestern Greenland during winter-spring. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, doi:10.5194/acp-17-8577-2017.
- 4) Martin, S., R. Drucker and M. Fort, 1995: A laboratory study of frost flower growth on the surface of young sea ice. *J. Geophys. Res.*, **100**, C4, 7027-7036.
- 5) Style, R. W. and M. G. Worster, 2009: Frost flower formation on sea ice and lake ice. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L11501, doi:10.1029/2009GL037304
- 6) Roscoe H.K., B. Brooks, A.V. Jackson, M.H. Smith, S.J. Walker, R.W. Obbard and E.W. Wolff, 2011: Frost flowers in the laboratory: Growth, characteristics, aerosol, and the underlying sea ice. *J. Geophys. Res.*, **116**, D12301, doi:10.1029/2010JD015144.
- 7) 船橋沙貴, 尾関俊浩, 安達聖, 2020: 塩水氷上の霜柱状突起から成長するフロストフラワー, 雪氷研究大会, P1-22.
- 8) Nakayama, M., K. Naoki, T. Tanikawa and K. Cho, 2024: Development of a sea ice tank system for measuring microwave properties of sea ice, *J. Glaciol.*, 1–10, doi:10.1017/jog.2024.6