

二段階製法による氷柱花作製—花氷の形状予測—

丸山翔生¹・杉原幸信²・上村靖司²

(1:長岡技術科学大学大学院 工学専攻機械工学分野 2:長岡技術科学大学 技学研究院 機械系)

1. はじめに

氷柱花は外観の美しさから飲食業界や観光業界で需要がある。しかし、飲料用の透明度が高い小さな氷柱花を作することは容易ではない^[1]。そこで、透明度の高い飲料用氷柱花を作製するために、先行研究では本研究室で開発した放射製氷技術を用いて、放射製氷過程の途中で食用花を直接挿入し、凍結を継続させることで氷柱花の製作を試みた。先行研究で作製した氷柱花を図1に示す。放射製氷技術を使用して氷柱花を作製する方法では、氷の成長に伴って花弁の下に気泡が発生し、白濁した氷となった^[2]。そこで、本研究では第一段階として滴下法を用いて花や葉の入った氷(以降花氷と呼ぶ)を作製し、切り出し(STEP1)、放射製氷過程の途中で挿入して取り込ませる(STEP2)という2段階製法(図-2)によって、高品質な氷柱花を作製を試みた。

氷の透明度を下げる主な原因は気泡である。氷の成長により水中に含まれていた空気が飽和に達して気泡が発生し、その気泡が水中に捕捉されることで白濁した氷となる^[3]。この気泡発生メカニズムから先行研究では、1軸方向に氷を成長させる放射製氷技術における気泡発生条件を明らかにし、気泡発生を抑制した無気泡の氷を安定して作製できる方法を提案した^[4]。本研究でも気泡発生メカニズムからSTEP1の2軸方向(円筒座標系)に成長する花氷の気泡発生条件を明らかにし、気泡発生を抑制した無気泡の花氷を安定して作製できる条件を検討していく。

気泡発生条件を求めるためには液体の体積の時間変化を求める必要がある。本研究の場合、つららのように2軸方向へ氷が成長し、さらに花氷表面には液体が常に供給され、上部から下部へと流れるため、ある時刻に花氷を覆っている液体の体積の時間変化を直接求める事は難しい。そこで、花氷の一定時間経過前と後の体積の差を花氷を覆っている液体の体積と仮定し、求める事にした。本報告では花氷の体積を算出するために必要な花氷の形状を予測する式を求め、実際に作製した花氷と比較し、評価した結果を示す。

2. 花氷作製方法

花氷を作製するSTEP1について説明する。花氷作製装置の概要を図3に示す。なお、①～⑥は熱電対による温度測定位置を示す。断熱槽は市販の冷凍ストッカーを使用した。この冷凍ストッカーは槽内温度を -30°C にすることができるが、槽内温度を -10°C から 0°C の範囲で安定して保つことが困難であった。そこで、槽内上部に熱交換チューブを巻き付けて -30°C から -20°C の不凍液を循環させ、 -10°C か



図1 先行研究で開発した氷柱花

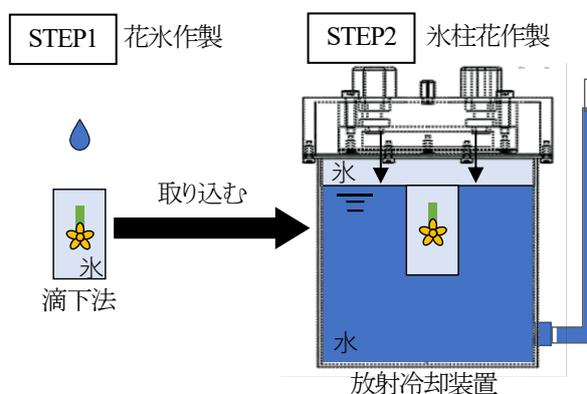


図2 2段階製法

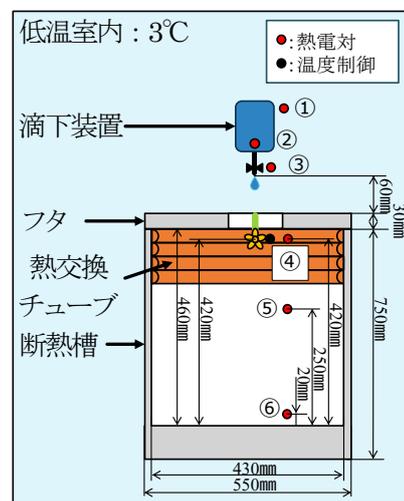


図3 花氷作製装置

ら 0°C の槽内温度を実現した。また槽内温度を一定に保つため、槽内温度が設定値以上になった場合には、スイッチをON(不凍液の循環開始 or 冷凍ストッカーをON)にし、設定値以下になったらスイッチをOFF(不凍液の循環停止 or 冷凍ストッカーをOFF)にする温度制御を行った。槽内の温度分布を図4に示す。図4(a)では、設定値を -3°C としたときの槽内温度を示す。槽内上部の温度は 5°C 程度のばらつ

きがあり、最下部・中部との温度差は 3℃程度であった。(b)では設定値を−13℃としたときの槽内温度を示す。槽内上部の温度は 5℃程度のばらつきがあり、最下部・中部との温度差は 10℃程度であった。花氷作製では、上部の 5℃程度の温度変動と中部・最下部との温度差を許容した。

花氷作成の手順は次のとおりである。まず温度制御により一定に保たれた断熱槽内に花や葉を設置する。その後水滴の滴下間隔を調整し、水を花や葉に供給する。水滴の滴下をおよそ 24 時間継続し、氷を成長させ、十分に成長した花氷をバンドソーで切り出す。また、滴下間隔は 0.12 mL / min、水温は平均 3.5℃、室温と滴下部の周辺温度は平均値で約 3.7℃である。

3. 花氷の形状予測

3.1 花氷の形状予測

氷柱の形状は氷柱表面に流れる水滴が凍結することで発生する凹凸など様々な要因によって確率的に決定されることが分かっている。このような氷柱の形状を予測するために多くの研究が行われてきた。その中でも KRZYSZTOF SZILDER らが提案した氷柱成長の解析モデル(1994)は、熱平衡方程式と物質平衡方程式の単純な微分形式を解析的に解くことで複雑な氷柱の形状予測を簡易にした^[5]。本研究ではこの解析モデルを参考に花氷の形状予測を行った。ここで、花氷の根元部分の半径 r と先端部分の長さ l の関係のイメージ図を図 5 に示す。

花氷の根元部分の半径 r は花氷表面から冷気への総熱損失から

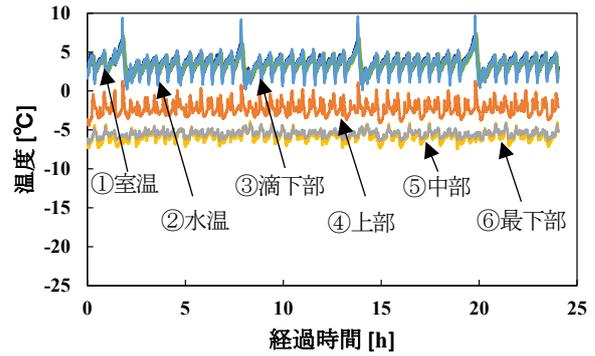
$$r = r_0 \left[(2 - 3k) \frac{h_0 \Delta T}{L_F \rho r_0} t + 1 \right]^{\frac{1}{2-3k}} \quad (1)$$

と算出できる。また、花氷の先端部分の長さ l は花氷先端から滴り落ちる水滴(以降排水と呼ぶ)における総熱損失から

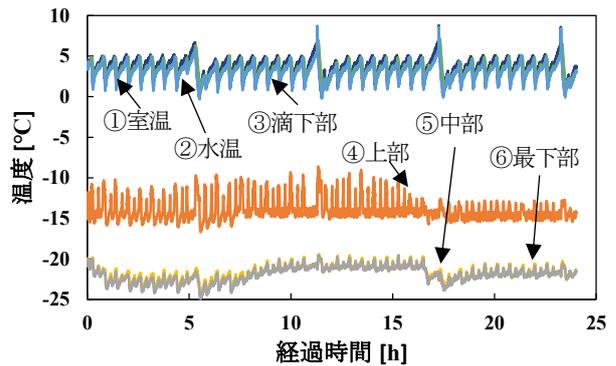
$$l = r_0 \frac{h_D \Delta T_D}{\delta L_F \rho} t = r_0 \frac{r_0 h_D \Delta T_D}{\delta h_0 \Delta T} \frac{h_0 \Delta T}{L_F \rho r_0} t = r_0 B \frac{h_0 \Delta T}{L_F \rho r_0} t \quad (2)$$

と算出できる。ここで、 r_0 は先端の花氷の半径(=液滴半径)であり、滴下の様子を撮影・測定した結果を基に 3.0×10^{-3} m とした。 k は流れの種類によって決定する係数であり、花氷作製条件が自然対流かつ層流で空気が流れているため、0.25 とした^[6]。 L_F は水の凝固潜熱で 333.5×10^3 Jkg⁻¹、 ρ は氷の密度で 917 kg m⁻³ とした^[7]。 h_0 は対流熱伝達率 [W m² K⁻¹]、 ΔT は花氷表面(0℃)と空気との温度差 [K]、 t は経過時間[s]、 h_D は排水における熱伝達率 [W m² K⁻¹]、 ΔT_D は空気と排水の温度との温度差 [K] である。なお、このモデルでは氷柱先端からの熱流束は、半径 r_0 における氷柱からの横方向の熱流束と等しい ($h_D \Delta T_D = h_0 \Delta T$) と仮定している。さらに、花氷先端が円筒状であるという仮定から δ は円筒の厚さ [m] を示す。

図 5 の 2 つの座標 $(r, 0)$ 、 (r_0, l) を使用して花氷の輪郭の式



(a) 不凍液の循環による冷却(設定温度: −3℃)



(b) 冷凍ストッカーによる冷却(設定温度: −13℃)

図 4 断熱槽内の温度分布

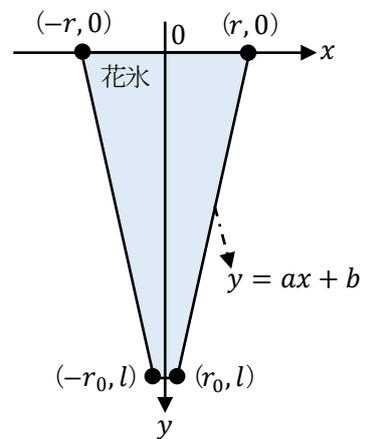


図 5 花氷の根元部分の半径 r と先端部分の長さ l の関係

を導出する。ここで、今回参考にしてしている KRZYSZTOF SZILDER らが提案した氷柱成長の解析モデルでは氷柱側面の輪郭の形状を線形として仮定しているため、花氷側面の輪郭の形状も線形として考える。定数を $\alpha = \frac{h_0}{L_F \rho r_0}$ 、 $\beta = 2 - 3k$ と書き換えると、直線の式 $y = ax + b$ より傾き a は

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{0 - l}{r - r_0} = - \frac{B \alpha t}{[\beta \alpha \Delta T t + 1]^{\frac{1}{\beta}} - 1} \quad (3)$$

と求めることができる。また、切片 b は図 5 の座標 $(x, y) = (r, 0)$ を使用すると

$$b = -ar = \frac{Bar_0t[\beta\alpha\Delta Tt + 1]^{\frac{1}{\beta}}}{[\beta\alpha\Delta Tt + 1]^{\frac{1}{\beta}} - 1} \quad (4)$$

と求めることができる。以上の計算結果より、花氷の輪郭(直線の式)は

$$y = ax + b$$

$$y = -\frac{Bat}{[\beta\alpha\Delta Tt + 1]^{\frac{1}{\beta}} - 1}x + \frac{Bar_0t[\beta\alpha\Delta Tt + 1]^{\frac{1}{\beta}}}{[\beta\alpha\Delta Tt + 1]^{\frac{1}{\beta}} - 1} \quad (5)$$

と表すことができる。式(5)より変数 ΔT , t の決定により形状予測が可能であることが分かる。

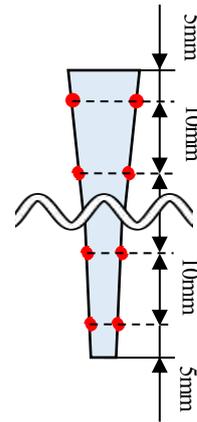


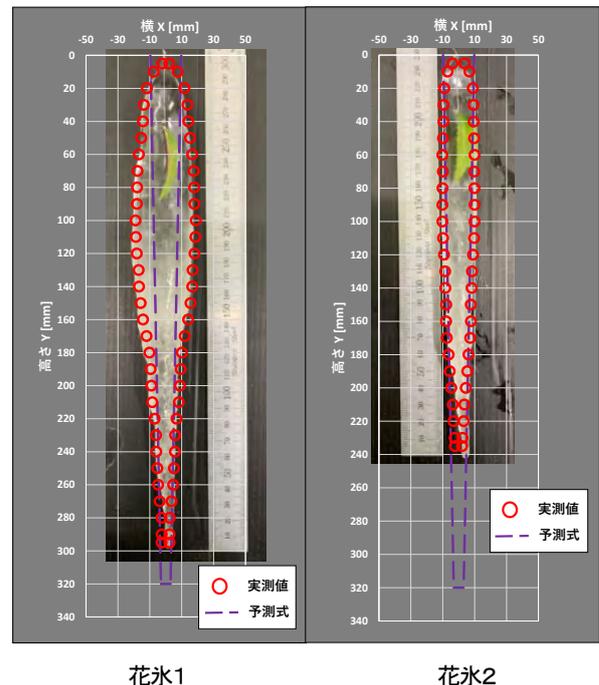
図6 花氷の直径測定位置

3.2 花氷の形状予測の評価

前節で求めた花氷の輪郭の式について、実際に作製した2つの花氷と比較し、評価した。評価方法として、画像解析ソフト ImageJ を使用して作製した花氷の直径を測定した。直径の測定位置を図6に示す。また、作製した花氷とその直径の測定結果、さらに式(5)から求めた花氷の形状予測結果を図7に示す。なお、図7に示す花氷1, 2の実験条件は図3の上部の温度④がそれぞれ平均 -2.4°C , -2.3°C である。これらの結果から、半径方向(X)では花氷の根本付近($0 \leq Y \leq 40$)で予測結果との違いが確認できた。また、花氷1では中部付近($40 \leq Y \leq 180$)で予測結果よりも直径が大きくなり、たる状になっていた。一方、花氷2では実際の形状と予測結果がおおよそ一致した。このことから実験ごとにばらつきはあるものの、式(5)を用いることで花氷の直径をある程度予測できることが確認できた。長さ方向(Y)では、予測結果ほど実際の花氷が伸びていないことが確認された。氷柱に供給する水の供給速度の変化は氷柱の長さに影響を与えるが、半径には影響しないということ分かっている⁸⁾。そのため本研究の場合、滴下装置の性能上、水の供給速度が時間経過に従って減少したことが、花氷の長さが予測式と実測値とで異なった原因であると考えられる。以上から、滴下装置の改良を行い、供給速度を一定にすることで式(5)を使用して花氷の輪郭、すなわち、直径および長さを予測することは可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では無気泡氷柱花を作製する二段階製法の花氷作製時(STEP1)での花氷の形状予測について検討した。この形状予測はKRZYSZTOF SZILDERらが提案した氷柱成長の解析モデルを参考にした。形状予測評価では、半径方向は一部予測値がずれているものが確認されたが、定性的に概ね一致していると判断することができた。長さ方向は予測結果ほど実際の花氷が伸びていないことが確認された。これは水の供給速度が一定となっていないことが



花氷1 花氷2

図7 作製した花氷と各種結果の比較

原因と考えられるため、滴下装置の改良により改善されると考える。今後はこの花氷形状予測を使って花氷作製時の気泡発生条件を明らかにし、気泡発生を抑制した無気泡の花氷を安定して作製できる条件を検討する。

文献

- [1] 上村靖司, 星野真吾 (2008): 放射冷却による製氷過程の観察, 雪氷, **70**(5), 477-48.
- [2] 藤田愛稀, 杉原幸信, 上村靖司 (2022): 水滴下による氷柱花製造の試み, 雪氷研究大会(2022・札幌)講演要旨集, 23
- [3] 前野紀一 (1966): 氷の中の気泡, 雪氷, **28**(1), 11
- [4] 本田宇希, 上村靖司 (2018): 放射冷却による高品質製氷の実用化 初気泡析出条件, 寒地技術論文・報告集, 301-304

- [5] K RZYSZTOF SZILDER AND EDWARD P. LOZOWSKI (1994) : An analytical model of icicle growth, *Annals of Glaciology*, 141-143
- [6] 西川兼康, 藤田恭伸(1984):伝熱学, 理工学者, 204
- [7] 福迫尚一郎, 田子真(1988):, 氷、雪、および海氷の熱物性, *Netu Bussei*, 90-91
- [8] 前野紀一, 高橋庸哉(1985):つららの研究 I つららの構造と成長の一般的特徴, *低温科学 物理篇*, **43**, 125-138