

高電圧パルス印加による微気泡抑制

岡本忠次¹・○篠原良輔¹・藤崎颯太²・杉原幸信³・上村靖司³

(1:長岡技術科学大学大学院 工学研究科 2:長岡技術科学大学 工学部 3:長岡技術科学大学 機械創造工学専攻)

1. はじめに

高品質な氷(結晶粒が大きい, 結晶方位が揃っている, 気泡がない)は, その透明度や加工性の高さから特に飲食業などで需要があり, なかでもバーテンダー業界では丸氷などに使用する無気泡氷の需要が高い。また, 学術研究においては単結晶氷に力学的試験等の試料としての需要がある。そのため本研究室では, 放射冷却を用い, 上記の高品質な氷を作成する技術について研究を行ってきた¹⁾。

本報告では氷の透明度を下げる主因である気泡のうち, 製氷初期に発生する微気泡群の抑制方法を提案し, 氷の透明度評価からその有効性を確認した結果を報告する。また, 単結晶氷の作製を目指し, より大きな結晶粒を得るための製氷方法の提案とその結果を報告する。

2. 気泡の析出メカニズムについて

放射冷却を用いた製氷において, 氷に発生する気泡は, 氷の初晶形成時に氷に取り込まれる微「気泡群」と氷の成長に伴い所定の厚さに達した後に発生する「気泡列」の二種類に分けられる(図1)。気泡列の抑制方法は先行研究²⁾により解明済みであるため, 本研究では微気泡群に注目した。微気泡群は初晶のデンドライト(樹枝状結晶)付近に発生することが分かっている。デンドライトは, 過冷却度が高い液体の過冷却が解消され, 結晶成長が始まった際に発生し, 過冷却された原料水の体積が大きいほど大きく成長する。微気泡群がデンドライト付近に発生するメカニズムは, 過冷却が解消した際に水中の溶存気体の拡散速度よりも結晶成長速度の方が早くなった結果, デンドライト部分を中心に局所的に溶存気体の濃度が飽和に達するからだと考えられている³⁾。このことから, 過冷却度が小さいうちに過冷却の解消を促進し, デンドライトの成長速度を遅くすることで, 微気泡群の発生を抑制できると考えられる。

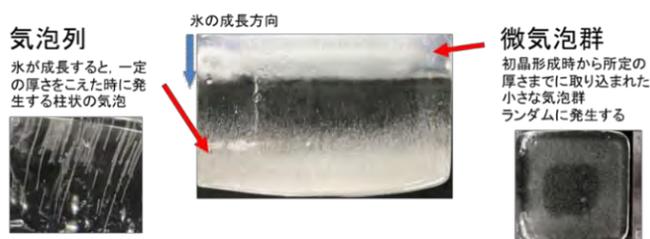


図1 氷に析出する気泡の種類

3. 高電圧パルス印加による過冷却の解消

3.1. 実験概要

過冷却水に電場を付与することで核生成が促進されるという報告は多くの研究者によりなされている⁴⁾。本研究室でも, 高電圧パルスの印加により核生成が促進されるかに注目して研究を行っており, 高電圧パルス(6000V, 9000V, 12000V)の印加が有効であると明らかになっている⁵⁾。本研究では, 先行研究で行われなかった6000V以下の高電圧パルスの印加が氷の核生成の促進に有効か検討を行った。

3.2. 実験方法・条件

実験装置の概要図を図2に示す。製氷ユニット上部に小さな穴を開け, 電極を原料水へ3mm差し込み高電圧パルスの印加を行う。高電圧パルスの印加には耐電圧試験機(TEXIO GPT-12003 200VA)を使用し, 1秒間の高電圧パルス印加を1分間隔で46回繰り返した後, 自動で停止するように設定した。また, 実験条件を表1に示す。

3.3. 実験結果

条件別に10回ずつ実験を行った結果を図3に示す。結果からわかるように, 高電圧パルスを印加した場合, すべての条件において核生成が2℃以下で行われており, 印加しなかった場合に比べて明らかに核生成を促進していることがわかる。次に製氷した氷の観察結果を図4, 透明度の測定結果を表2に示す。ここで, 氷の透明度測定方法について説明する。図5に示すように, 氷に対してレーザー光を投下させた時の強度と空気中での強度を比較し, 9か所の平均値をその氷の透明度としている。比較に用いた計算式を式(3.1)に示す。図4からわかるように, 高電圧パルスを印加した場合はどの電圧条件においても微気泡群が析出していないことが確認できる。このことから, 6000V以下の高電圧パルス印加も微気泡群の抑制に有効であるとわかる。

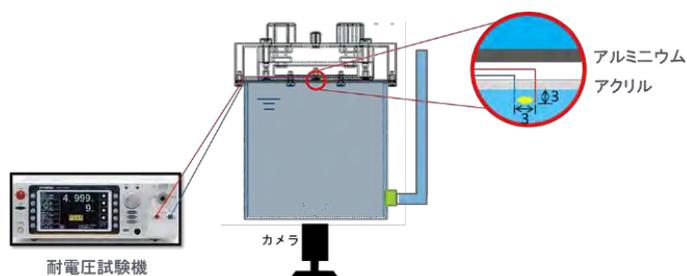


図2 実験装置概要

表 1 実験条件

使用試料	循環不凍液温度	電圧	雰囲気温度
脱気水	-15°C	無し, 50, 500, 5000 V	2°C

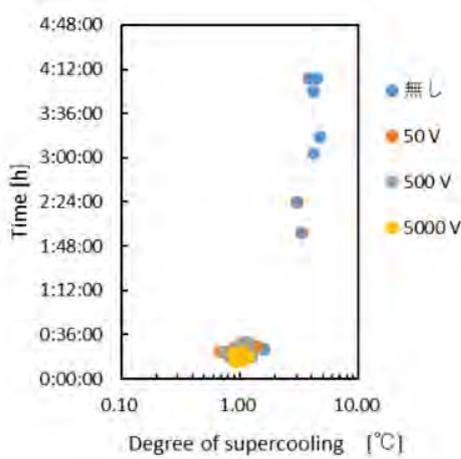


図 3 過冷却度と核生成時間

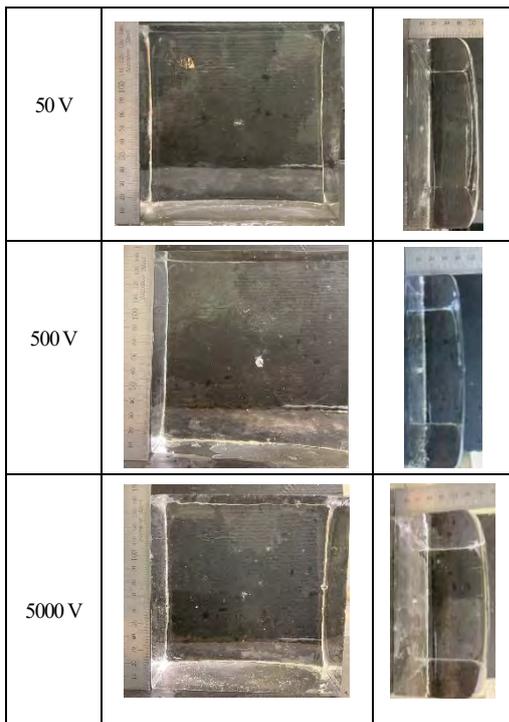


図 4 製氷した氷の観察結果

表 2 氷の過冷却度, 透明度, 標本分散

電圧 [-]	過冷却度 [°C]	平均透明度 [-]	標本分散 [-]
50	1.3	0.904	0.229
500	1.0	0.917	0.128
5000	0.90	0.930	0.109

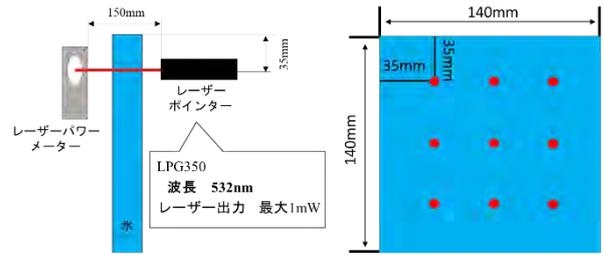


図 5 透明度の測定方法

$$\text{透明度} = \frac{\text{氷を透過させた時の強度}}{\text{空気中での強度} \times 0.96} \quad (3.1)$$

4. 製氷面の一角からの核生成による結晶サイズの改善

4. 1. 実験方法

高電圧パルスを印加して製氷した氷の結晶観察結果を図 6(a)に示す. 図 6(a)においては製氷面中心部に高電圧パルスを印加しており, その結果製氷面中心部から核生成が始まり, デンドライトが外へ向けて成長することで, 氷の結晶粒を分断していると考えられる. そこで, 図 6(b)に示すように高電圧パルスの印加位置を製氷面の角にし, デンドライトの成長方向を限定することで, より大きな結晶粒が得られ, 単結晶氷に近づくのではないかと考えた. そこで図 7 に示すように, 高電圧パルスの印加位置を製氷面の中心から製氷面の一角に変更し, 製氷を行った. なお, 印加する電圧は 5000V とした.

4. 2. 実験結果

製氷した氷の偏光観察結果を図 8 に示す. 1回目の実験では写真右上の角付近から核生成が行われているとわかる. また, 2回目は製氷面上部の中心付近から, 3回目は右端から核生成が行われている. どの実験結果においても高電圧パルスの印加位置付近から核生成が行われており, 核生成位置から離れた場所に大きな結晶が確認できる. 以上のことから, 製氷面角からの核生成は, 中心からの核生成に比べて大きな結晶を得やすく, 単結晶氷の作成に向けて有益であると考えられる. また, 単結晶氷の作成には氷の核生成およびデンドライトの成長が大きく関係していると分かった.

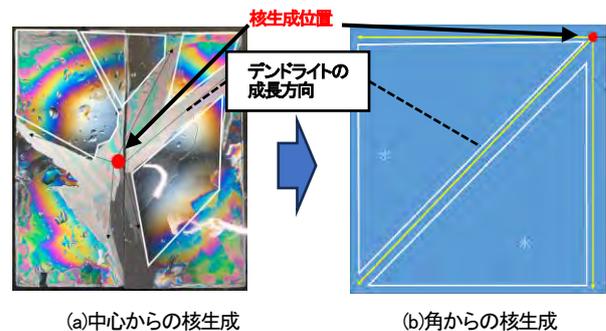


図 6 核生成位置の変更による結晶サイズの改善案

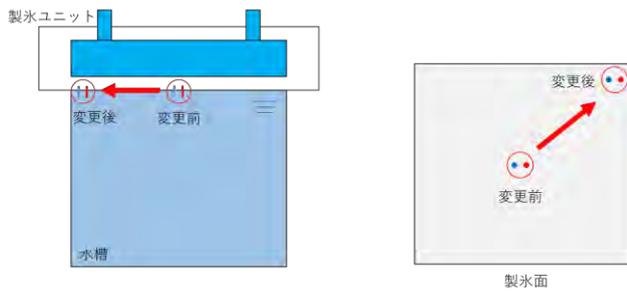


図7 実験装置の変更部分



図8 氷の結晶観察結果(赤丸は核生成位置)

5. まとめ

放射冷却を用いた製氷における、高電圧パルスの印加による製氷初期の微気泡群の発生抑制効果を 6000V 以下の条件で検討した。その結果、同様に核生成の促進が確認でき、微気泡群の抑制に有効であると明らかになった。また、高電圧パルスの印加位置を製氷面の一角にすることで、より大きな結晶粒を得られることがわかった。

6. 参考文献

- 1) 上村靖司, 星野真吾, (2008): 「放射冷却による製氷過程の観察」, 日本雪氷学会誌雪氷, 70 巻, 5 号, pp477-485
- 2) 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: 初期気泡析出条件」, 寒地技術論文・報告集: 寒地技術シンポジウム p301-p304
- 3) 前野紀一, (1966): 「水氷境界における気泡の発生と捕捉」, Low temperature science. Series A, Physical science, 24:91-109
- 4) 七里公毅, 永田隆広(1978): 「水の凍結に及ぼす電気の影響: 基礎」, 日本結晶成長学会誌 5 巻(1978)3 号
- 5) 藤崎颯太(2022): 「放射冷却における微気泡群発生抑制に有効なパルス電圧範囲」, 雪氷研究大会(2022・札幌), A1-24,24(2018)