

高電圧パルス印可による初晶形成促進

吉田匡貴¹・岡本忠次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界などで需要がある. 中でもバーテンダー業界では丸氷などを作るための無気泡氷の需要が高い. そのため当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.

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.

2. 放射冷却による製氷装置

実験に用いた製氷装置の概略図を図1に示す. 雰囲気温度 2℃に設定した低温室内に製氷用の水槽を置き, その上に製氷ユニットを設置する. 製氷ユニットは内層と外層に分かれており, 内層内には隣室にある不凍液循環装置水槽から不凍液が流れており, 不凍液により冷やされた内層下面のアルミ板が水槽内の原料水の熱を奪って, 氷が成長する仕組みとなっている. なお, 内層と外層の間には 3mm の隙間があり, これにより放射冷却を実現している.

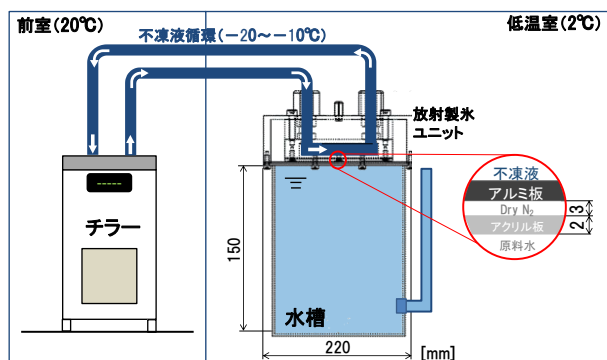


図1 製氷装置概略図

3. 気泡の析出メカニズムについて

放射冷却によってつくる氷に析出する気泡は, 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厚さに達した後に析出する気泡列の二種類に分けられる(図2). 気泡列の抑制方法は先行研究¹⁾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)付近に析出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析出するメカニズムは, 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²⁾. 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2 氷に析出する気泡の種類

4. 高電圧パルス印可による過冷却の解消

4.1. 実験概要

過冷却水に通電することにより過冷却が解消されることは知られている³⁾. 本研究では, 製氷中の原料水に高電圧パルスを印可することで, 過冷却を強制的に解消し, それによる氷塊中の微気泡群発生への影響を調査した.

本研究では, 高電圧パルスを発生させるため, 使い捨てカメラから取り出したフラッシュ回路と 10 段の Cockcroft-Walton 回路を用いて, 高電圧パルス発生装置を作製した(図3).



図3 高電圧パルス発生装置

4.2. 実験方法

実験装置の概略図を図4に示す. 製氷ユニット内に高電圧

パルス発生装置の導線を通し、水槽内の試料水内に導線が出るようにセットし、放射冷却を行う。導線付近の試料水の水温はT型熱電対を用いてリアルタイムで確認し、水温が0℃以下になったことが確認出来たら1分ごとに高電圧パルスを印可する。そして、過冷却が解消されるまでの時間とそのときの過冷却度を調査した。

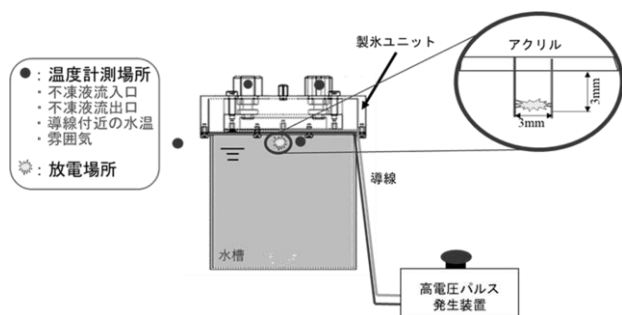


図4 電極の配置

4. 3. 実験結果

高電圧パルスの印可の有無で3回ずつ実験を行い、それぞれの過冷却解消までの時間と過冷却度を測定した。その結果、過冷却解消までの時間は、高電圧パルスの印可無しの場合が40～60分程度であるのに対して、高電圧パルス印可した場合には20～30分とおおよそ半分となった。また過冷却度は、高電圧パルス印可無しの場合に3～5℃であったのに対して、高電圧パルス印可によって2℃前後となり、原料水への高電圧パルス印可が、過冷却解消までの時間短縮と過冷却度抑制に有効であることが示された。

図5に高電圧パルス印可の有無における過冷却解消時のデンドライトの成長の様子と取り出した氷の概観図をそれぞれ示す。高電圧パルスを印可せずに製氷した結果、デンドライト(図の白枠)は厚さ方向に約10mm程度まで成長していることが確認でき、取り出した氷はデンドライトが成長した厚さまで微気泡群の析出が確認できた。それに対して、パルスを印可して製氷すると、デンドライトは厚さ方向にほとんど成長しておらず、取り出した氷も微気泡群の析出が目視では確認できなかった。これは高電圧パルスを印可したことで、核生成時の過冷却度を下げ、デンドライトの厚さ方向への成長量および成長速度を下げることであったと考えられる。

	過冷却解消時のデンドライト成長	取り出した氷の外観
パルス印加 なし		
パルス印加 あり		

図5 デンドライト成長と氷の外観

5. 氷の透明度評価

5. 1. 実験概要

前章で述べたように、高電圧パルスを印可することで、微気泡群を抑制できることが目視で確認できた。この時の氷の透明度を定量的に評価するため、レーザー光を氷に透過させた強度値から局所的な透明度を評価する方法を考案した。

5. 2. 実験方法

透明度測定の概要図を図10に示す。測定点は氷の上面から35mmの場所を30mm間隔で1辺につき4カ所、4辺で計16カ所測定した。氷の透明度はレーザーの透過率によって評価し、以下のように定義する。

$$\text{透過率} = \frac{\text{氷透過時のレーザー光強度}}{\text{空気中でのレーザー光強度}} \times 100 [\%]$$

実験に用いるレーザーは、氷に吸収されにくい波長である532nmのものを使用した⁴⁾。

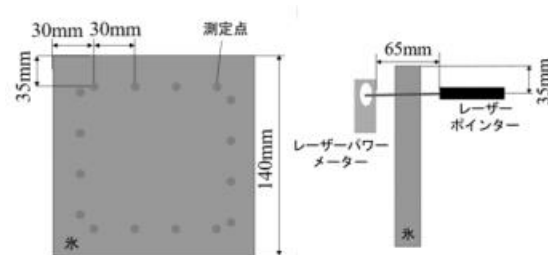


図6 透明度測定の概要図

5. 3. 実験結果

高電圧パルス印可をして製氷した氷(過冷却度2.0℃)とパルス印可なしで製氷した氷2つ(過冷却度3.9℃、4.5℃)の計3つの氷の透明度を評価した。透明度の測定結果を表2に示す。表中の各測定点の透明度と16点の平均値より、過冷却度が大きくなるにつれて透明度が低くなる傾向がわかる。分散を見ても過冷却度にもなって大きくなっており、特に過冷却度4.5℃では、局所的に他の測定点に比べて著しく透明度の低い箇所がある。これは、目視観察で見られる微気泡が析出している箇所に対応する。

それぞれの氷の概要図を図7に示す。製氷面の写真から、過冷却度が大きくなると、中央から放射状の伸びる微気泡が明瞭に表れてくる様子がわかる。側面の写真を見ると、過冷却度2.0℃ではほとんど微気泡には見えないが、3.9℃になると左側(初期冷却面)に微気泡が見えるようになり、4.5℃になると雲のように微気泡が群となって析出している様子が観察される。

よって、冷却中の過冷却水に高電圧パルスを印可し過冷却解消を促進することは、微気泡群の抑制に非常に有効で

あることが分かった。

表 1 各過冷却度における透明度

過冷却度 [°C]	透明度 [%]				
2.0	90.9	90.7	88.4	87.8	平均
	86.7	89.0	89.2	88.7	88.7
	88.1	86.1	89.0	87.8	分散
	88.4	89.8	90.1	89.0	1.6
3.9	86.4	89.5	81.8	88.9	平均
	88.0	88.9	89.2	89.8	87.0
	86.1	85.8	88.9	87.7	分散
	87.0	80.6	86.1	87.3	6.5
4.5	88.2	87.9	79.9	64.3	平均
	61.8	86.8	87.1	84.9	83.0
	84.9	84.6	85.7	85.2	分散
	85.7	86.8	87.1	87.1	60.5

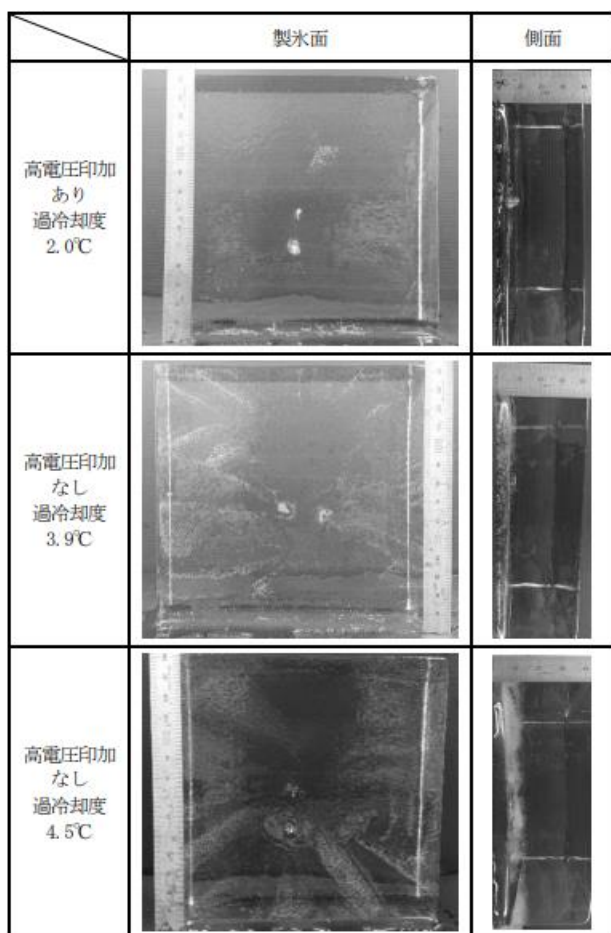


図 7 透明度を評価した氷の外観

6. 結言

放射冷却による製氷の初期に発生する微気泡群の抑制のため冷却しながら高電圧パルスを一定時間間隔で与え続け

る実験を行った。その結果、過冷却が破れるまでの時間、その時の過冷却度と共に半減させることができた。できた氷の観察をしたところ、過冷却度が小さいほど微気泡の析出が少なく透明度の高い氷ができることが示された。

7. 謝辞

本研究では科研費(21K14091)の助成を受け遂行されたものであることを記し謝意を表する。

8. 参考文献

- 1) 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：寒地技術シンポジウム p301-304
- 2) 前野紀一, (1966):『水氷界面における気泡の発生と捕捉』, Low temperature science. Series A, Physical sciences, 24: 91-109
- 3) 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
- 4) 櫻井俊光, ハイクスローピアン, 染川智弘, 藤田雅之, 本山秀明, 渡辺興亜, 井澤靖和(2013):「レーザーによる氷の融解に関する研究—氷床の底に生きる生命体の検出を目指して—」, 雪氷研究大会(2013・北見)講演 要旨集 p136