

放射製氷において製氷面の温度勾配が初晶成長に及ぼす影響

泉野祥太郎¹・○吉田匡貴¹・杉原幸信²・上村靖司²

(1:長岡技術科学大学大学院 工学研究科 2: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(単結晶, 結晶粒が大きい, 結晶方位が揃っている)は, その透明度や加工性の高さから特に飲食業界での需要が高い. 当研究室では放射冷却を用い, 上記のような氷を製作する技術について研究を行ってきた. 氷を作る際に初晶が単一で発生し, 成長すれば大きな結晶を有する氷が出来るのではないかと考え, 初晶の発生位置や成長方向, 成長速度等に注目した. 泉野ら(2020)は, 初晶形成過程を観察するため, 製氷面の動画観察と熱電対による温度観察の手法を確立した¹⁾. 本研究では, 不凍液の流入出や流量を変えることで, 6つの温度勾配を与え, 初晶形成への影響を調査した.

2. 実験装置

実験に用いた製氷装置の概略図を図1に示す.

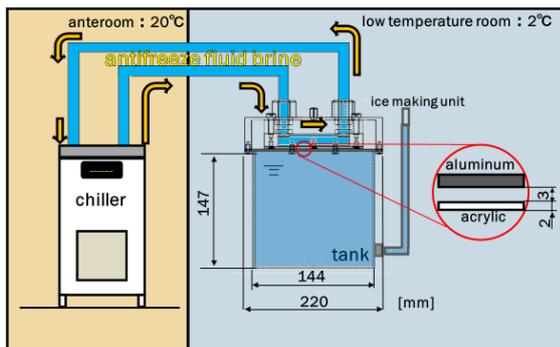


図1 製氷装置概略図

製氷装置は製氷ユニットと水槽から成り, 製氷ユニットは内層と外層に分かれている. まず, 水槽に原料水を満たし, 空気が入らないように製氷ユニットで蓋をする. 内層内には全室にある低温室循環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い取り, 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.

3. 初晶の形成過程の観察

観察方法について, 製氷過程の中で特に初晶形成過程に着目し, 初晶形成のメカニズムを調査するために製氷面を撮影した動画観察と, 製氷面付近の水温の計測の 2 つを行った.

3.1. 動画撮影と画像解析

初晶の拡がりの様子を真下から観察するために中央部分

に直径 100mm の円形の穴をあけた台座を作成した(165mm 四方, 高さ 250mm). 台座に製氷用水槽を置き, 中央部に空けた穴を通してビデオカメラで撮影を行った. 初晶の拡がりを観察するにあたり, 電灯の下などの周囲が明るい場所で観察を行うと初晶の拡がりをうまく撮影することが出来なかった. そのため, 低温室内に暗幕で仕切った暗室を用意し, その中で製氷面を光源で照らし観察を行った. 光源装置は日本ピー・アイ社製の近赤外線を照射するハロゲンランプ光源装置(PCS-UHX-150)を用いた. 暗室内を光源装置の発する熱で温めないためにライトガイドを用いて光源部のみ暗室内に入れ, 本体は暗幕の外に出して実験を行った.

初晶の拡がりの動画撮影を行い得られたデータをある時間から一定間隔ごとに切り取り, 並べたものを図2に示す. 図中の破線は初晶の拡がりの先頭部分を結んだものである. 左下から過冷却が破れ, 右上方向に向かって初晶が成長する様子が一応は観察された. しかし, 画像が大変見づらく, 初晶の拡がりがうまく観察できなかったため, 背景差分, コントラスト調整, 2値化による画像処理を行った(図3).

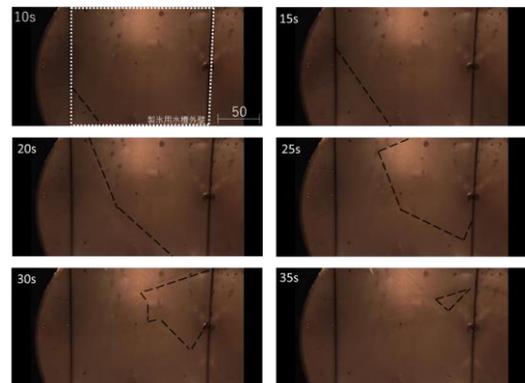


図2 初晶拡がりの様子

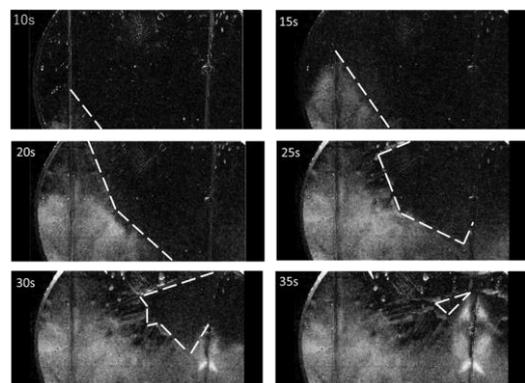


図3 初晶拡がりの様子を画像処理したもの

3.2. 熱電対による温度分布測定

製氷面の温度分布を計測するために製氷面に熱電対を直接貼りつけ、他にも不凍液の流入出口や雰囲気温度を合計で18箇所計測した。計測点を図4に示す。

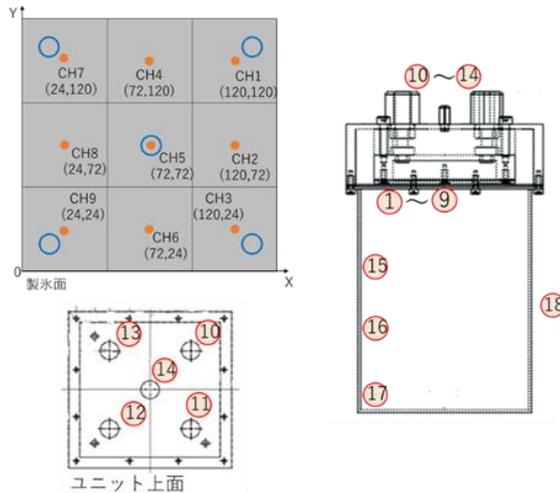


図4 熱電対による温度計測箇所

3.3. 初晶画像と温度分布の対応付け

本実験では初晶の発生、成長過程を製氷面の温度計測により得られたデータから定量的に明らかにしていくことを試みる。まず製氷面の撮影から得られた初晶の拡がり、製氷面の温度計測結果から類推する初晶の拡がりに対応していることが重要である。そこで、これらに対応しているか確認を行った。なお、動画及びデータロガーのデータの0点合わせ(経過時間合わせ)は、動画に見えるところで熱電対に触れ、温度が急激に上昇している点を基準にした。その結果、経過時間と温度計測上で0°Cとなった点を見比べたとき、数秒の誤差はあれど、おおむね動画上と、温度計測上のデータが一致することが確認された。そして、この時の誤差率の平均値は5.86%であった。よって、これら2つのデータを併用し、初晶発生点、初晶成長速度、初晶形成時間、過冷却度、伝播時間、平均等価円直径、最大等価円直径、温度勾配を読み取り、パラメータとした。

4. 製氷面の温度勾配が初晶成長過程に及ぼす影響

4.1. 付与した温度勾配

製氷面の温度勾配による初晶形成過程への影響を調べるため、不凍液の流出入口を変え、4隅冷却型、中央冷却型、斜方成長型、2極冷却型の4つの温度勾配を与えた。また、不凍液の流出入口を入れ替えて温度勾配に変化をつける以外にも、不凍液流路に追加してバイパスを設け、流路を分岐させ、ボールバルブを用いて流量を変化させることで、バイパスを設けない状態のもの[斜方強調型(温度勾配小)]とボールバルブを全開にした状態のもの[斜方強調型(温度勾配大)]の2種類の温度勾配を与え、合計で6つの温度勾配を与えた。よりクリアな温度勾配をつけるため、斜方強調型と流路分岐斜方強調型にはアルミ板にアルミテープを貼り、断熱し、クリアな温度勾配を与えた。また、この2つの温度勾配で実験を行った際、熱電対が初晶発生のきっかけとして作用する可能性があるため、製氷面の熱電対をとって実験を行った。6つの温度勾配を与えた際のアルミ板をサーモカメラで撮影した画像を図5に示す。

配大)]の2種類の温度勾配を与え、合計で6つの温度勾配を与えた。よりクリアな温度勾配をつけるため、斜方強調型と流路分岐斜方強調型にはアルミ板にアルミテープを貼り、断熱し、クリアな温度勾配を与えた。また、この2つの温度勾配で実験を行った際、熱電対が初晶発生のきっかけとして作用する可能性があるため、製氷面の熱電対をとって実験を行った。6つの温度勾配を与えた際のアルミ板をサーモカメラで撮影した画像を図5に示す。

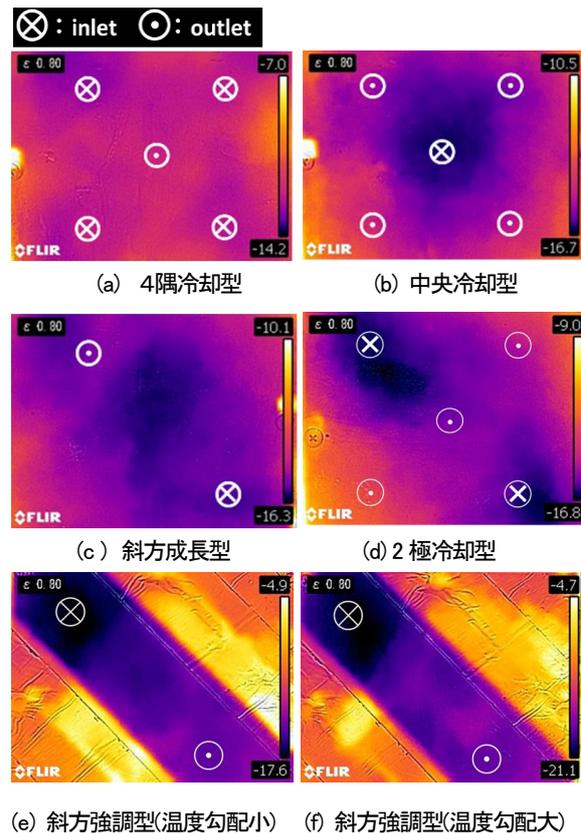
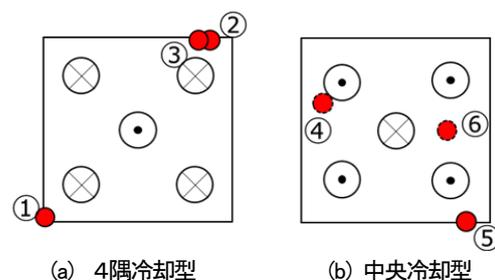


図5 与えた温度勾配

4.2. 実験結果

(1) 初晶発生点

それぞれの温度勾配において、3回ずつ実験を行った。このとき、それぞれの初晶発生点を図6に示す。



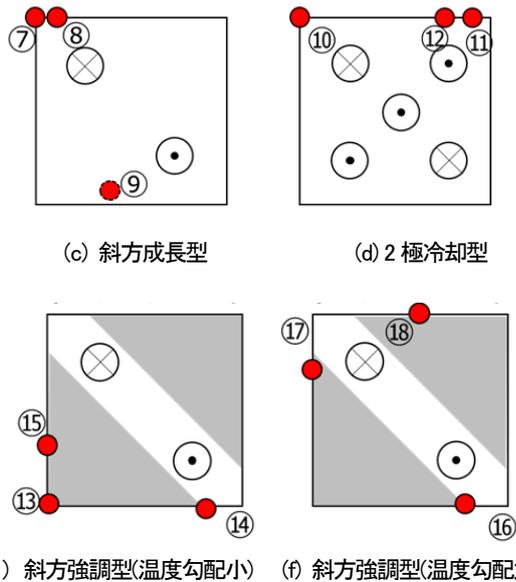


図6 初晶発生点

基本的に初晶は製氷用水槽の壁面から発生することが確認された。これは周囲が水面と異なる環境である壁面が初晶発生のかきかけとして働いたためであると考えられる。しかし、製氷面において最も冷えているところが中心部にある中央冷却型や斜方成長型の場合、初晶の発生点が壁面ではなく中央寄りに発生する様子が観察された(④, ⑥, ⑨)。このことから、初晶の発生点は多少、製氷面温度の影響を受けていることが確認された。また、斜方強調型においては、断熱部からも初晶の発生が確認できた(⑬, ⑮, ⑰, ⑱)。

(2) 初晶成長速度

初晶成長速度と過冷却度の関係を図7に示す。

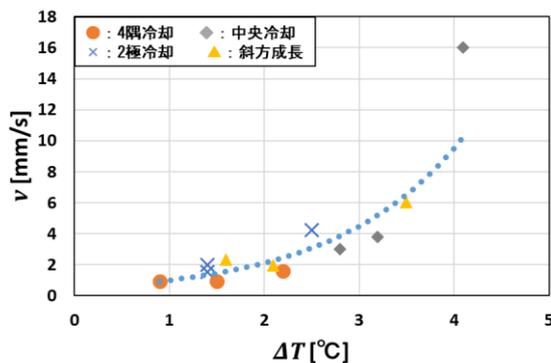


図7 初晶成長速度と過冷却度の関係

図7より過冷却度が高いほど初晶成長速度が大きくなるのが分かり、その関係は指数関数的に増大することが確認された。これもまた、過冷却度が大きくなるほど製氷面付近原料水温度が持つ負の温度エネルギーが大きいため、過冷却が破れたとき、一気に氷結晶が広がるためであると考えられる。

また、初晶成長速度と初晶形成時間の関係を図8に示す。

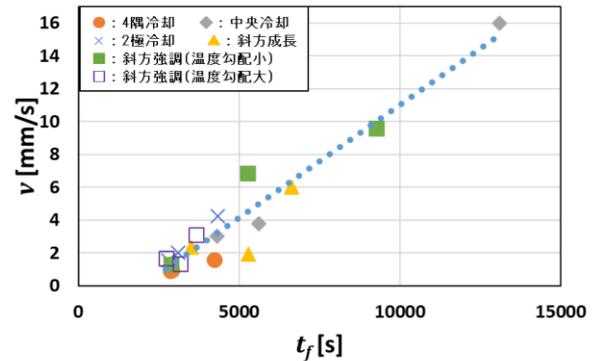


図8 初晶成長速度と初晶形成時間の関係

図8より初晶成長速度は初晶形成時間と正の相関があることが分かった。そして流路を分岐させ、製氷面の温度勾配の傾斜を大きくしても初晶成長速度に影響を及ぼさないことが分かった。この理由としては、初晶成長速度は温度勾配傾斜の影響よりも初晶形成時間や過冷却度への依存度が大きいためであると考えられる。また、熱電対の有無で初晶成長速度にかかる影響に大きな変化は見られなかった。このことからやはり、初晶成長速度は過冷却解消時の原料水の過冷却度に関わるパラメータであることが推察される。

(3) 温度勾配と角度差

結晶が温度勾配に沿って成長しているかを確認するため、温度勾配と結晶成長方向の角度差を調査した。角度差と温度勾配の大きさの関係を図9に示す。

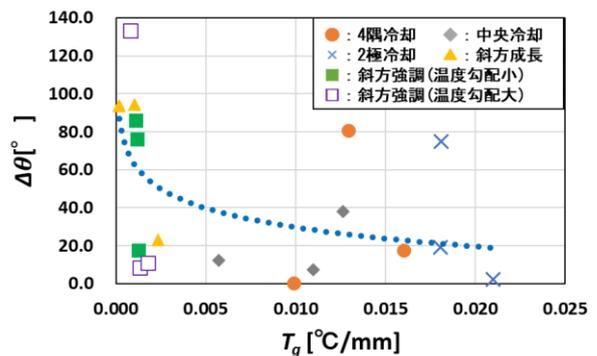


図9 角度差と温度勾配の関係

図9より、温度勾配が大きいほど初晶の成長方向と温度勾配との角度差は小さくなる傾向があることが確認できた。よって、初晶の成長は温度勾配角度に影響を受け、温度勾配に沿って成長すること考えられる。

(4) 結晶面積

平均等価円直径と初晶成長速度の関係を図 10 に示す。

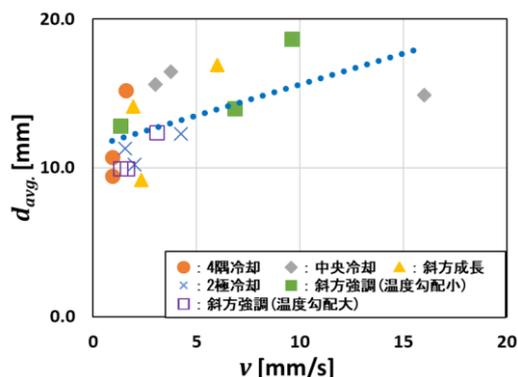


図 10 平均等価円直径と初晶成長速度の関係

図 10 より、平均結晶面積は初晶成長速度が速くなるほど、大きくなる傾向になることが分かった。これは初晶成長速度が速いと、他の初晶が発生する以前に、最初の方に発生した初晶が成長し、初晶の乱立が防がれたためであると考えられる。(2) で初晶成長速度は初晶が形成されるまでの時間及びその時の過冷却度に大きく依存することが分かっている。つまり、より大きな結晶を有する氷塊を製氷したい場合は、製氷面の材質を変更するなどして、過冷却が破れるまでの時間を遅らせることが有効であると考えられる。また、斜方強調型が、流路分岐斜方強調型に比べ、大きくなる傾向にあることが分かった。つまり、温度勾配が均一に近い場合、大きな結晶を有する氷塊を入手しやすい可能性が示唆された。

5. まとめ

放射製氷における大きな結晶を有する氷の生成条件を検討するため、製氷面の温度勾配が初晶成長過程に及ぼす影響を調査した。そのために、製氷面の温度勾配を任意に変更できる製氷ユニットを用いて実験を行い、初晶発生点、初晶成長速度、結晶面積、温度勾配の角度と成長方向などについて考察を行った。結晶面積は、初晶成長速度が速く、温度勾配が小さいほど平均等価円直径が大きくなることが分かった。そのため、大きな結晶粒を含む氷塊を製氷したい場合、初晶成長速度を速くするために製氷面の材質を変更したり、過冷却を強制的に破る手段(衝撃など)を用い、過冷却が破れるタイミングを制御することで過冷却が破れるタイミングを意図的に遅らせることや温度勾配を均一に近づけることが有効であると思われる。

文献

1) 泉野祥太郎, 上村靖司, 杉原幸信 (2020):放射製氷における初晶形成過程の観察 - その2 核成長と温度変化の対応付け -, 雪氷研究大会(2020・オンライン)講演要旨集, p10.