

連続引上製氷における引上げ力の測定

○杉原幸信¹・水橋奈那¹・大瀧智宏¹・上村靖司¹

(1:長岡技術科学大学)

1. はじめに

飲料用の氷には冷却効果だけでなく、透明さや形状といった外観の美しさも求められる。現在、厨房用として普及しているセル方式やオーガ方式を採用した製氷機で作る氷は、製氷業者によるアイス缶方式で製氷された氷と比較して亀裂が入っていたり、気泡の混入で白濁したりしており、美観の点で劣る。また現状では、複雑な形状の氷を得るには切削や融解による除去加工、型に水を流し込んで凍らせる方法に頼るしかない。

これら従来の製氷方式に対し、綱島・上村(2018)は着氷面が小さくて薄い任意断面の氷板を作り、それを断続的に引き上げて、氷柱を製氷する厨房・カウンター用途を想定した連続引上製氷方式(Continuous Drawing Method, CD法)を提案し、125分で直径25mm、高さ25mmの氷を作製した。そして、CD法の氷はセル方式よりも気泡や亀裂が少なく透明で、平均結晶粒径が約3倍となることを示した。さらに水橋ら(2019, 2020)は、CD法において初期氷板作製時に生じる漏れや割れなどの現象と着氷力の関係性を示唆し、連続引上製氷装置へロードセルを組み込んで着氷力の測定を試みた。本研究では、引き続き初期氷板の形成過程に注目し、形成した初期氷板を傷つけることなく引上げ可能な条件を氷厚さと最大引上げ力の観点から整理する。また、引上げの際に観察された漏水、成功、剥離、破壊の4種類の現象と引上げ力の過渡的变化について報告する。

2. 実験装置および実験手順

図1に連続引上製氷装置の概要を示す。上面に内径25mmの円筒(筒状製氷型、PTFE製)を取り付けた水槽へ給水槽から送水し、筒状製氷型上端まで水を満たす。水槽を載せた昇降ジャッキを上昇させ、筒状製氷型内の水面とアルミ製冷却棒の下端を接触させる。氷点下の低温循環水を通した冷却棒(設定温度 -1°C)によって所定の初期冷却時間(1分から23分の間を2分刻みで変更)冷却して水面に初期氷板を形成し、その後に冷却棒の温度を保ちつつ昇降ジャッキを5秒ごとに0.2mm下降させる。この際の引上げ力を、冷却棒の上部に取り付けたカンチレバー式ロードセル(最大荷重200N、(株)AND製)で測定する。そして、取り出した初期氷板の氷厚さを測定する。

実験装置の制御にはArduinoを用い、冷却棒の表面に取り付けたサーミスタによる測定温度と設定温度を比較し、低温循環水槽をPWM制御することで冷却棒の温度を調整した。昇降ジャッキを下降させる距離は、エンコーダ付きモーター

を使用することで制御した。なお、取り出した氷分の水補給のためにリザーバータンクを設置している。実験は全ておよそ 2.5°C の低温室で実施した。

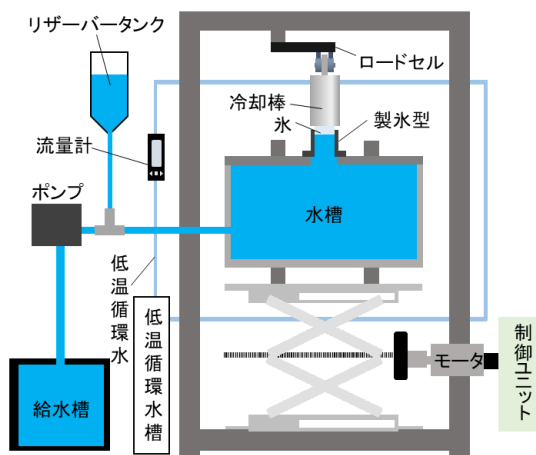


図1 連続引上製氷装置の概要。

3. 実験結果

3.1 引上げ時に観察された4種類の現象

初期冷却時間を1分から23分の間で変化させて水面を冷却し、初期氷板を形成した。その後に昇降ジャッキを下降させて氷板を製氷型から取り出した。この一連の過程において、漏水、成功、剥離、破壊の4種類の現象が観察された。さらに、剥離と破壊の複合的な現象が見られた。それぞれの写真を図2に示す。図2の上側は冷却棒、下側は製氷型の写真である。漏水は初期氷板が十分に形成されておらず、リザーバータンクから送水される水が冷却棒と製氷型の間から漏れる現象である。成功は冷却棒下端に初期氷板が付着し、傷つけることなく取り出すことに成功した現象である。剥離は昇降ジャッキを下降させた際に初期氷板が冷却棒下端から剥がれ、製氷型内に残留して取り出すことができなかった現象である。破壊は初期氷板が割れて製氷型内と冷却棒の両方に残留する現象である。冷却時間が短いと漏水が生じ、長くなると破壊や剥離が頻繁に生じた。

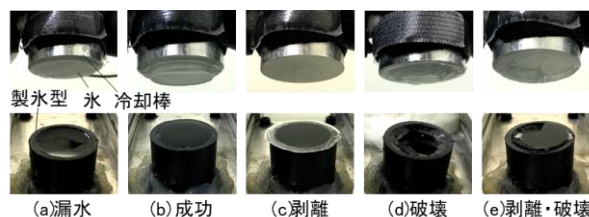


図2 引上げ時に観察された現象。

3.2 成功、剥離、破壊における引上げ力の過渡的变化

図 3(a)から(b)に成功、剥離、破壊における引上げ力の過渡的变化の一例を示す。横軸は引上げ動作を開始した時刻をゼロとしている。図 3(a)に示す成功は初期冷却時間を 7 分としたときの結果であり、7 分経過した後に 5 秒ごとに 0.2 mm 昇降ジャッキを下降させる動作を 7 回加えている。同様に、図 3(b)の剥離は初期冷却時間が 11 分の結果で下降動作は 5 回、図 3(c)の破壊は初期冷却時間が 13 分の結果で下降動作は 9 回である。また、図中に引上げ力 F が最大となった点を F_{max} として表した。

図 3(a)より、成功時の引上げ力 F はジャッキを下降させた瞬間に急増し、次の動作まで緩やかに減少していることがわかる。また、 F_{max} となる 2 回目の引上げ動作以降、 F の下がり方が急になり、指数関数的減衰を見せている。減衰過程において、製氷型の内円筒と初期氷板の側面がせん断方向に擦れながら、すなわち動摩擦を生じながら氷板が引き上げられているのだと考えられる。さらに、徐々に引き上げた瞬間の荷重の増加分が少なくなり、最終的には引上げた瞬間の引上げ荷重の変化がなくなっていることから、引上げ動作の度に製氷型内と接する氷板の氷厚さが減少していると推測できる。

図 3(b)と(c)より、剥離と破壊では引上げた瞬間に F がステップ状に増加して一定の値を保つ現象が幾度か続くことがわかる。また、剥離と破壊ともに成功のときとは異なり、 F_{max} を示したのちに F がゼロとなる。したがって、剥離と破壊では

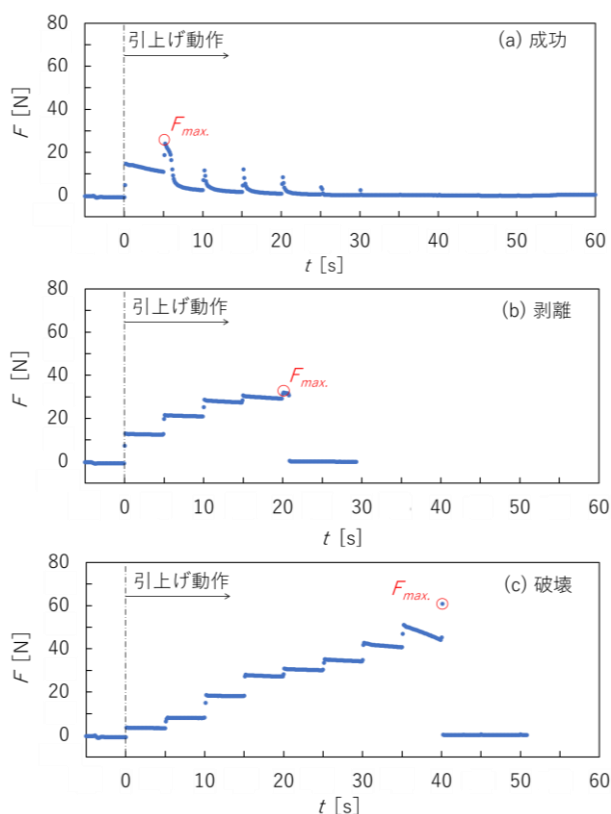


図3 引上げ力 F の過渡的变化。

製氷型内円筒と初期氷板側面の間で動摩擦を生じることなく静摩擦を保ち、 F_{max} に達した瞬間にある氷板が冷却棒から剥離したり、割れたりするのだと考えられる。

3.3 4 種類の現象と氷厚さおよび最大引上げ力の関係

図 4 に初期氷板厚さ h と最大引上げ力 F_{max} の関係を示し、漏水領域、成功領域、剥離・破壊領域に分類した。この図より、 h と F_{max} はおよそ比例関係にあり、初期氷板の側面と製氷型内円筒との接触面積が氷板引上げの成否に影響すると考えられる。初期氷厚さ h が 1.4 mm より薄いと漏水が生じ、 $h > 2.8$ mm かつ $F_{max} > 30$ N の領域では剥離や破壊の頻度が増えることがわかった。したがって、漏水せず、引上げ時に剥離や破壊を生じさせないためには $1.4 \text{ mm} \leq h \leq 2.8 \text{ mm}$ の氷板を $F_{max} \leq 30 \text{ N}$ の範囲で引上げればよいことがわかった。

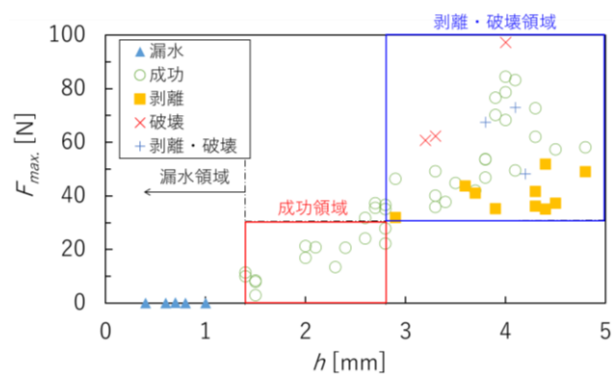


図4 初期氷板厚さ h と最大引上げ力 F_{max} の関係。

4. まとめ

本研究では、CD 法において重要となる初期氷板の形成過程に注目し、形成した初期氷板を傷つけることなく引上げることができる最適条件を調査した。その結果、初期氷板の形成および引上げにおいて問題となる現象には漏水、剥離、破壊があることがわかった。本実験装置の範囲では、 h が 1.4 mm より薄いと漏水が生じ、 $h > 2.8$ mm かつ $F_{max} > 30 \text{ N}$ の領域では剥離や破壊の頻度が増えることがわかった。また、漏水が生じず、なおかつ引上げ時に剥離や破壊が起こらない最適条件は、 $1.4 \text{ mm} \leq h \leq 2.8 \text{ mm}$ の氷板を $F_{max} \leq 30 \text{ N}$ の範囲で引上げることであることを示した。

文献

- 網嶋匠, 上村靖司 (2018): 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発, 雪氷研究大会 (2018・札幌) 講演要旨集, p.32.
- 水橋奈那, 岩橋大樹, 上村靖司, 杉原幸信 (2019): 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発-その 2: 初期製氷時間と溶存酸素濃度の検討, 雪氷研究大会 (2019・山形) 講演要旨集, p.47.
- 水橋奈那, 杉原幸信, 上村靖司 (2020): 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発-その 3: 製氷容器と氷との着氷力測定-, 雪氷研究大会 (2020・オンライン) 講演要旨集, p.11.