

氷柱連続引上げ製氷における引張/せん断着氷力測定

柏崎志武¹, ○丸山翔生¹, 上村靖司², 杉原幸信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系)

1. はじめに

透明さや形状といった外観の美しさは飲料用の氷の付加価値を高める上で重要である。現在、その場で氷を製造して使用する技術として普及しているオーガ方式、アイストレー方式、セル方式に対し、綱島ら(2018)は薄い円板状の氷を作り、それを断続的に引き上げることで、氷柱を製氷する氷柱引上げ式連続製氷技術を提案し、125分で直径25mm、高さ25mmの氷を作製できることを示した。また、杉原ら(2021)は引き上げ式製氷を行う際の剥離、成功における引上げ力の過渡的变化と氷厚さと最大荷重の関係について述べた。本研究では、筒状製氷型の内径を従来の25mmから30, 35, 40, 50mmと変化させ、冷却棒温度も -1°C から -3 , -5 , -10°C へ変化させて、引張/せん断の着氷力を測定した結果を示す。

2. 氷板引上げ実験の方法

図1に引上げ製氷の概要を示す。まず上蓋に異径の筒状製氷型(PTFE製, 内径25, 30, 35, 40, 50mm)を取り付けた水槽を水で満たす。そして冷却棒(アルミ合金製, 外径55mm, 設定温度 -1°C)を水面に所定の初期冷却時間(2分から30分の間で変更)だけ接触させて初期氷板を形成する。その後に冷却棒の温度を保ちつつ昇降ジャッキで水槽を5秒ごとに0.2mm下降させる。この際、冷却棒に作用する力(以降、引上げ力と呼ぶ)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。最後に、引上げた氷板の厚さを測定する。実験は約 2.5°C の低温室で実施した。

3. 引張とせん断の着氷力への影響

3.1 着氷面積と着氷力

成功は冷却棒側に氷板が冷却棒側に付着し引上げられる現象で、剥離は氷板が冷却棒から剥離し製氷型に残る現象を指す。ここで、成功時は氷-製氷型間のせん断着氷力を評価できると仮定し、製氷型から氷がはがれる際の引き上げ力 F_{Smax} を着氷面積 A_s で除すことでせん断着氷力 σ_s を算出した。剥離時は氷-冷却棒間の引張着氷力を評価できると仮定し、冷却棒から氷が剥離する際の引き上げ力 F_{Tmax} を着氷面積 A_T で除すことで引張着氷力 σ_T を算出した。種々の材料に対する着氷力は既往研究の知見を参照する。本実験では製氷型にPTFE, 冷却棒にアルミニウム合金を使用している。吉田ら(1993)の実験より -10°C におけるPTFEのせん断着氷力は150kPa, アルミニウムのせん断着氷力は250kPaと報告されている。また、前野(2006)は同じ材質でも引張着氷力はせん断着氷力の5~6倍程度大きくなると報告している。

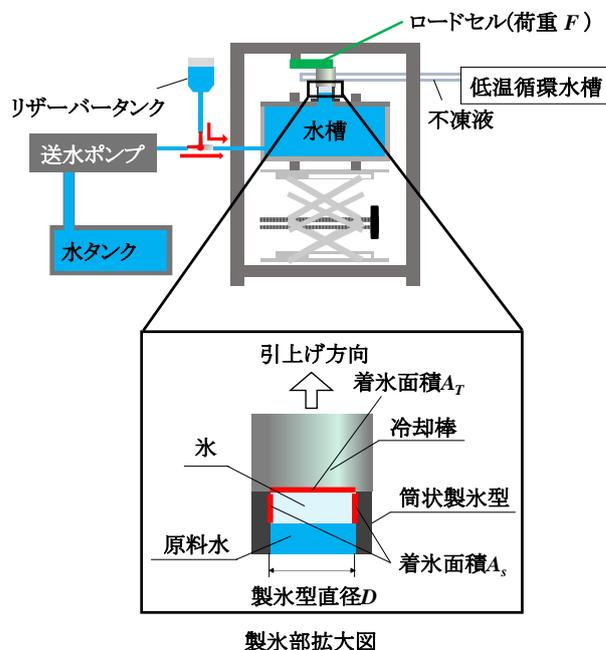


図1 引上げ製氷の概要。

そのため、吉田ら(1993)のせん断着氷力の結果よりアルミニウムでの引張着氷力はおおよそ1500kPaになると推測される。

図2に着氷面積 A_s とせん断着氷力 σ_s の関係を示す。また、図3に着氷面積比 A_T と引張着氷力 σ_T の関係を示す。ここで凡例は製氷型の内径を表し、それぞれの図中の実線は各材料における先行研究の着氷力を示す。図2より成功時のせん断着氷力は吉田ら(1993)の実験から得られたPTFEのせん断着氷力値150kPaとおおよそ一致している。一方、図3より剥離時の引張着氷力は100kPaで一定の値を示しており、吉田ら(1993)と前野(2006)の研究より推測した1500kPaより一桁ほど小さい値となった。その原因として、冷却棒温度が高いことが考えられる。氷-アルミニウムのせん断着氷力250kPaは -10°C での結果であり、低温になれば着氷力も増加する。これに対し、本研究における冷却棒の設定温度は -1°C 付近と融点に近い温度帯であるため、吉田ら(2000)より氷の表面融解が起き、着氷力が減少したと考えられる。

3.2 冷却棒温度による着氷力の変化

氷-アルミニウム間の引張着氷力に対する冷却棒温度の影響を調査するために氷板引上げ実験の方法を1部変更した追加冷却実験を行った。変更点として、 -1°C に設定した

冷却棒を水面に初期冷却時間(5min)接触させることで初期氷板を形成したのち、冷却棒の設定温度を -3 、 -5 、 -10°C と変更し、追加冷却した。このとき、剥離を生じやすくするために追加冷却時間を20分と長くしている。その後、冷却棒の温度を保ちつつ昇降ジャッキで水槽を5秒ごとに0.2mm下降させた。製氷型は内径30mmのものを使用した。図4に追加冷却温度と引張着氷力の関係を示す。白線の数値は各温度での着氷力の平均値である。図4より追加冷却温度が低くなるほど引張着氷力が増加していくことが明らかとなった。

3.3 引上げ製氷の成功領域

最後に、引上げ製氷の成功領域を検討する。まず、引張着氷力での最大荷重 F_{Tmax} [N]は着氷面積 A_T [m^2]を用いると(1)のように表せる。ここで、 σ_T は氷とアルミニウム間の引張着氷力[Pa]、 D は製氷型直径[mm]である。

$$F_{Tmax} = \sigma_T A_T$$

$$F_{Tmax} = \sigma_T \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

せん断着氷力での最大荷重 F_{Smax} よりも引張着氷力での最

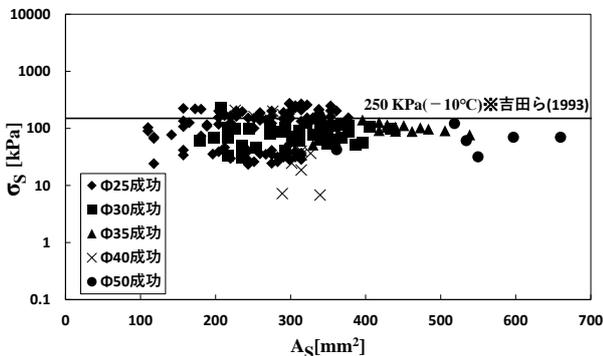


図2 せん断着氷力と製氷型側面の着氷面積との関係 (材料:PTFE).

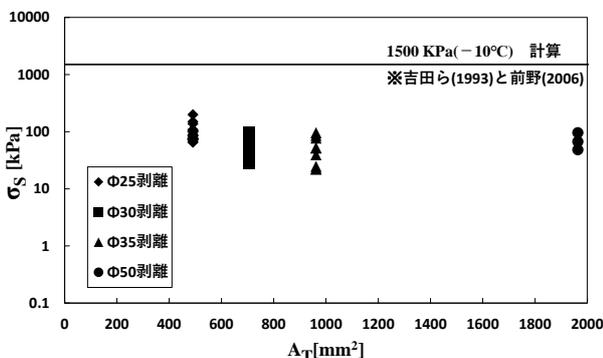


図3 引張着氷力と冷却棒底面の着氷面積との関係 (材料:アルミニウム合金).

大荷重 F_{Tmax} が大きいときに引上げが成功すると考え、このときの関係を表すと式(2)となる。これを式(1)を用いて整理すると、式(3)の関係を導くことができる。

$$F_{Tmax} > F_{Smax} \quad (2)$$

$$F_{Smax} < \sigma_T \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

図4の追加冷却実験から得られた各温度での引張着氷力の平均値を式(3)の σ_T に代入し、製氷型の各直径における成功から剥離へと移り変わる荷重を算出した。図5にこの算出した荷重を線で示し、冷却棒を 1°C に制御した状態で行った各直径の最大荷重の実験結果をプロットで示す。ここで、成功での最大荷重は氷—製氷型間のせん断着氷力を示し、剥離での最大荷重は氷—冷却棒間の引張着氷力を示している。図5に示す線を境に、これより F_{max} が大きくなれば剥離が生じ、小さくなれば成功するといえる。

以上をまとめると、図4より追加冷却実験では冷却棒の温度を低くすることによって氷—アルミニウム間の引張着氷力が大きくなることが分かった。また、着氷力が大きくなることで図5より同じ直径でも氷—アルミニウム間の最大荷重 F_{Tmax} が大きくなることが分かった。そのため、引き上げが成功す

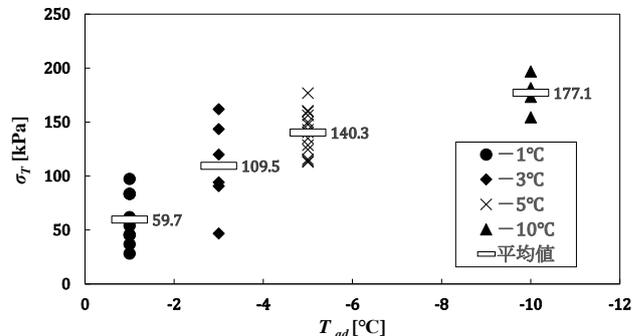


図4 追加冷却温度と引張着氷力の関係。(内径:30mm)

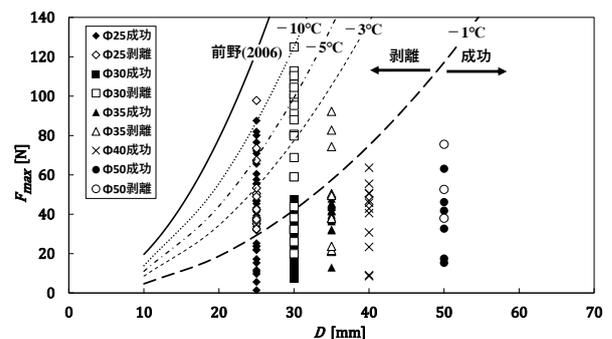


図5 追加冷却温度と引張着氷力の関係。

る限界の氷—製氷型間の最大荷重 F_{Smax} を増加できるので、氷厚さを大きくし、氷—製氷型間の最大荷重 F_{Smax} が増加しても氷板の引張が成功する。したがって、冷却棒の温度を低くすることで成功条件の拡大につながると考える。

4. まとめ

本研究では筒状製氷型の内径を変更した時の成功と剥離それぞれ最大荷重を測定し、引張とせん断着氷力の関係を示した。せん断着氷力は吉田ら(1993)の実験結果とおおよそ一致することを確認した。また、引張着氷力は前野(2006)の実験結果より低い値を示した。さらに、追加冷却実験として内径 30mm の筒状製氷型を使用し、冷却棒の温度を変更した時の引張着氷力を測定した。冷却棒の温度が低下すると引張着氷力が大きくなることが確認された。追加冷却実験では剥離しやすくするために冷却時間を長めにしていたが、今後は追加冷却した状態でこれまでと同様な冷却時間での実験を繰り返し行い、データを収集して求めた成功領域と比較、検討を行う。

文献

- 綱島匠, 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.
- 杉原幸信ら 2021: 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発-その4: 異形製氷型における引上げ試験-, 雪氷研究大会(2021・千葉-オンライン)講演要旨集, p.86.
- 前野紀一, 2006: 氷の付着と摩擦, 日本雪氷学会誌(2006) 68 巻 5 号, p.449
- 吉田光則ら 1993: 着雪氷防止技術に関する研究(第 1 報)-各種材料の着氷力について-, 北海道立工業試験場報告(1993)No.292.
- 吉田光則ら 2000: 着雪氷防止技術に関する研究(第 3 報)-滑雪と材料表面特性について-, 北海道立工業試験場報告(2000)No.299.