

# 卒業論文要旨

## スラリーアイス生成装置の運転条件と製氷能力の定量化

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1250109 智内 南登

### 1. 緒論

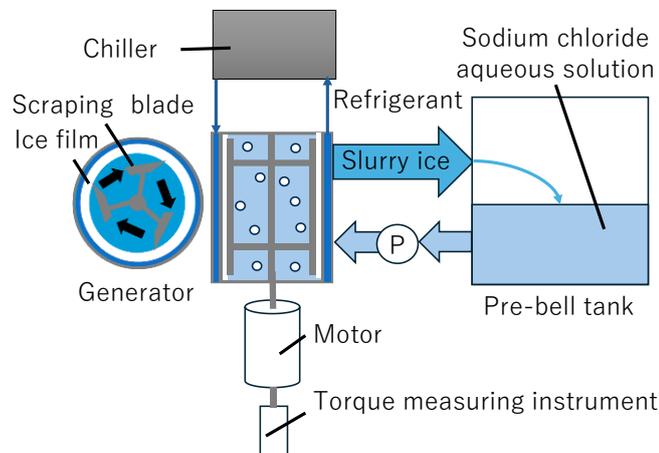
我々の研究グループで検討・実施しているスラリーアイス生成法は、ジェネレーター内の伝熱面に氷膜を成長させ、この氷膜を掻き取り刃で切削し、浮遊した氷粒子を攪拌混合する方式である。この際、製氷量は冷媒の温度により決定される。しかし、安定製氷には氷膜の成長速度と掻き取り刃による切削速度の関係が寄与する。氷膜の成長速度に対して過剰な掻き取り刃の切削速度では製氷に影響を及ぼす。本研究では、掻き取り刃の回転数における製氷を行い、製氷の経時変化の検証及び不安定製氷の原因を考察し、最も製氷に有効な回転数と製氷を妨げる回転数の見極めを行った。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置

本実験で用いたスラリーアイス生成装置を図1に示す。タンク内のNaCl水溶液が二重円筒構造のジェネレーターにポンプにより送られる。ジェネレーターの内円筒外側を流動する冷媒により内円筒内側の伝熱面に氷膜が形成される。回転する三枚の掻き取り刃で成長した氷膜を切削、攪拌混合することでスラリーアスを生成する。スラリーアスは予冷タンクに注入される。この過程を循環させ予冷タンクの氷粒子を増加させていき目標の氷充填率 (Ice Packing Factor, 以下 *IPF*) まで運転し、スラリーアスを貯蔵する方式である。

トルクメーター(ユニパルス製, UTMV-10Nm)によって氷膜を切削する際に掻き取り刃にかかるトルクを測定した。*IPF*測定はジェネレーターから予冷タンクに送液される間の水溶液の濃度から求めた。



#### 2.2 実験手順

本実験では冷媒の温度、ポンプの流量およびNaCl水溶液の初期塩分濃度は一定として製氷を行い、掻き取り刃の回転

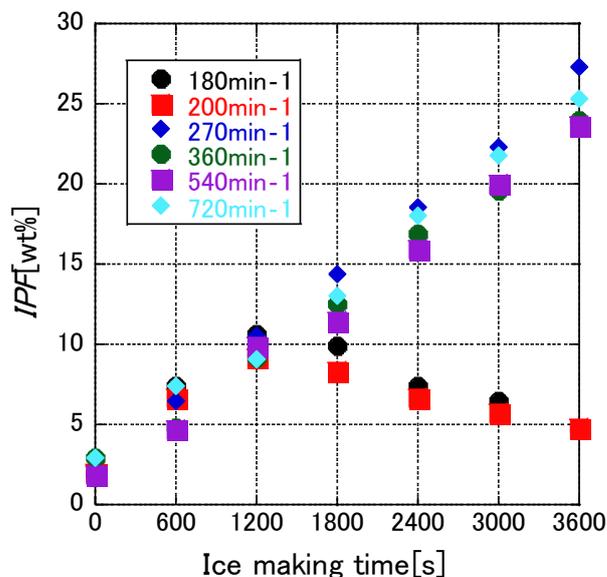
数のみ変更した。詳細な実験条件は表1に示す。測定は掻き取り刃トルクと*IPF*の経時変化として、製氷開始から3600s行った。トルク測定のサンプリング周期は0.5s、*IPF*のサンプリング周期は600sとした。

Table 1 experimental conditions

| Refrigerant temperature [°C]                          | -15                          |
|---|------------------------------|
| Pump flow rate [L/min]                                | 1.4                          |
| Initial salinity of NaCl solution [wt%]               | 1.0                          |
| Rotation speed of scraping blade [min <sup>-1</sup> ] | 180, 200, 270, 360, 540, 720 |

### 3. 実験結果

測定した回転数における*IPF*とトルクの経時変化を図2, 3に示す。*IPF*が減少傾向となった図2の回転数180min<sup>-1</sup>, 200min<sup>-1</sup>に着目する。1800~3600s間で両者の*IPF*は減少する。同様の時間領域で、図3に示すようにトルクは上昇を始め、最大で約8N・mの値を示した。これらの結果から、トルクの上昇と*IPF*の減少に関係性が見られた。



**Fig. 2** Relation between torque and ice making time

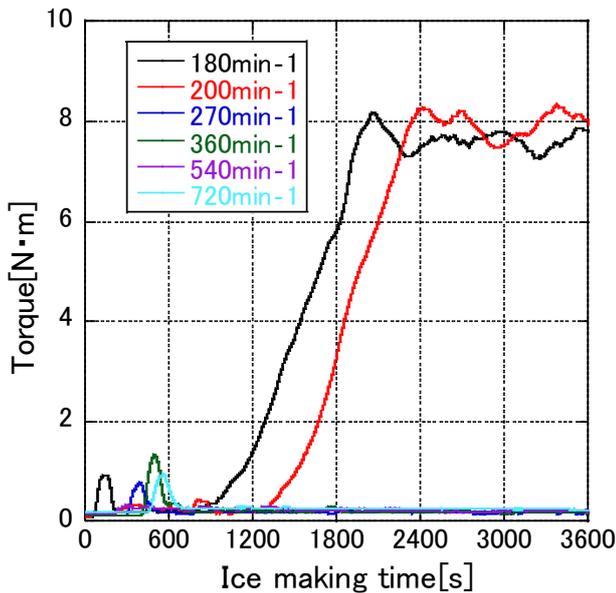


Fig. 3 Relation between torque and ice making time

#### 4. 考察

##### 4.1 トルク上昇についての考察

回転数  $180\text{min}^{-1}$ での実験直後の掻き取り刃周辺を撮影した図4により、掻き取り刃が氷膜に食い込んでいることが原因で、トルク上昇が引き起こされたと考えられる。



Fig. 4 Generator immediately after  $180\text{min}^{-1}$  Measurement

##### 4.2 掻き取り刃による侵入熱の考察

トルク上昇により、掻き取り刃の動力値がエネルギーに変換・損失しているかに着目する。氷膜の切削は氷の粉碎操作に相当するため、粉碎のエネルギー効率を考える。これにより生じるエネルギーの内、粒子生成に使用されるエネルギーの理想値は0.6%である<sup>(1)</sup>。つまり、99%以上のエネルギーは

振動や音、そして熱などの不要なエネルギーに変換される<sup>(1)</sup>。この中でも最も変換されるエネルギーは熱であり、その割合は約80%である<sup>(1)</sup>。これらのことを踏まえて、切削で生じる動力値に0.8を乗算したものを掻き取り刃による侵入熱とする。掻き取り刃による氷膜切削での動力値は

$$L = 2\pi Tn \quad (1)$$

$T$ : 掻き取りトルク [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ]

$n$ : 回転数 [ $\text{s}^{-1}$ ]

$L$ : 掻き取り刃の動力 [ $\text{W}$ ]

より求められる<sup>(2)</sup>。また、掻き取り刃の侵入熱 $Q$  [ $\text{W}$ ]は

$$Q = 0.8L = 1.6\pi Tn \quad (2)$$

から得られる。したがって、トルクの上昇に伴い動力値の大部分が熱エネルギーに変換され、スラリーアイス生成の製氷量の低減となったといえる。図2より  $IPF$  の経時変化から線形的に上昇する回転数と、製氷時間1800s以降に  $IPF$  が下降する回転数に分類することができる。ここで前者を安定製氷、後者を不安定製氷と位置付ける。後者の不安定製氷に着目すると、ある一定の  $IPF$  に到達後に線形的に減少する傾向が見られる。このことから、製氷運転において経時的に  $IPF$  を管理することで、製氷不具合を回避することが可能となる。また、安定製氷については、実験結果と式(1)から、より低回転にすることで、製氷効率が増すと考えられる。したがって、本研究により、安定・不安定製氷のターニングポイントを見極めることは、製氷効率と安定製氷管理に重要であることが明らかになったといえる。

#### 5. 結論

本研究ではスラリーアイス生成に掻き取り刃の回転数が及ぼす影響について調べた。その結果、製氷の経時変化における氷充填率 ( $IPF$ ) が線形的に上昇する安定製氷の回転数と、ある一定の  $IPF$  まで上昇した後に下降する傾向となる不安定製氷に分類できることが明らかになった。安定製氷に着目すると、回転数と製氷量に相関が見られ、より低速度が製氷効率に寄与する。また、不安定製氷では、傾向に再現性があったことから、製氷運転中の  $IPF$  の管理にて運転トラブル回避が可能となる。以上のことから、安定・不安定製氷の回転数における  $IPF$  のターニングポイントを見極める重要性を示すことができた。

#### 文献

- (1)三輪茂雄, "粉体工学通論", 日刊工業新聞社, pp.159
- (2)“工業力学入門講座 (第10回) トルクと回転数と動力”  
<https://www.washimoweb.jp/Technology/Statics/No10/Statics10htm>  
 (2025年2月1日閲覧)