

# 卒業論文要旨

## 嚥下可能なスラリーアイス生成装置の作成と掻き取り負荷の検討

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1230011 有田 寛史

### 1. 緒論

深部体温を運動前に低下させておくことで、運動継続時間を延長することが可能である。また、深部体温が 40 度を超えると運動パフォーマンスが急激に低下することも報告されている<sup>(1)</sup>。体温の上昇抑制と水分補給は熱中症対策につながる。スポーツ飲料から生成されたスラリーアスを体内に取り込むことができれば、効率的に深部体温の低下を達成でき、熱中症予防につながると期待されている。スラリーアスの嚥下可能性は嚥下困難者用食品の表示許可基準を参考に進める。これにより運動鍛錬者だけでなく、高齢者の熱中症対策にも用いることができる。設置場所を問わず、スラリーアイス生成を可能にするため、小型化された可搬式スラリーアイス生成装置の構築を目的とする。

### 2. ワンバッチ式スラリーアイス生成装置の製作

#### 2.1 装置の概要

本研究で製作した装置は、従来の装置からタンクを削除し、ジェネレーターのみで製氷から取り出しまで行うワンバッチ式ジェネレーターとなる。実験機の 3D モデルと寸法を図 1、図 2 に示す。実験機の製作には PETG の 3D プリントパーツを伝熱面と掻き取り刃以外の部品に用いた。基本構造は上部から水溶液を投入し、製氷後のスラリーアスを下部から取り出す構造になっている。ジェネレーター高さは 273mm、伝熱面高さは 150mm である。円周方向については外円筒内径が  $\phi 134\text{mm}$ 、ステンレス内円筒内径が  $\phi 110\text{mm}$  で、掻き取り刃と伝熱面のクリアランスは 0.5mm とした。また 3D プリントパーツの外円筒外壁の厚肉厚さを 5mm、フランジ部分の厚肉厚さを 10mm とした。

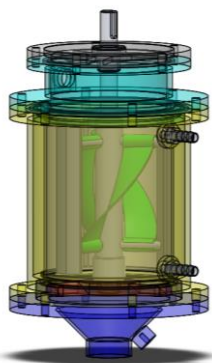


Fig.1 3D Model

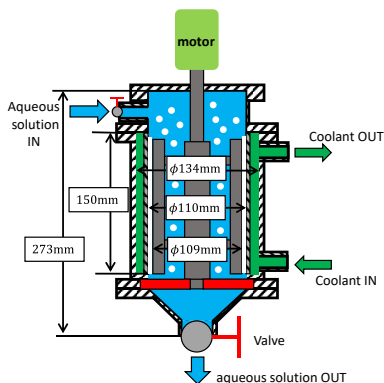


Fig.2 Cross Section of equipment

#### 2.2 ジェネレーター構造

製氷後のスラリーアスを供給しやすいようにジェネレーターの下部を円錐形にした。また下部軸受け腕に傾斜をつけることで円錐部分抵抗を減らし、氷粒子が閉塞リスクを下げた。また、回転掻き取り刃の腕に整流フィンをつけ、製氷中と取り出し時には回転方向を変え、上下流を操作できるようにした(図 3)。ジェネレーターの蓋には透明アクリル板を用いて製氷中の内部を観察できるようにした。

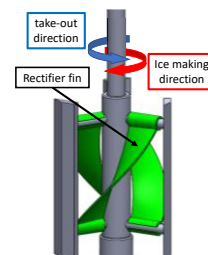


Fig.3 Rectifying fin attached scraping blade

### 3. 水溶液濃度と掻き取りトルクの関係

#### 3.1 目的

スラリーアイス生成装置の水膜掻き取りトルクと水溶液の濃度の関係は、単成分水溶液の場合、低濃度になるにつれて掻き取りトルクが大きくなる傾向にある<sup>(2)</sup>。本研究では主成分が塩分と糖分の 2 成分からなるスポーツ飲料を用いた製氷である。そこで、混合液から製氷する際の掻き取りトルクについて実験的に調べた。

#### 3.2 実験方法

実験サンプルはスポーツ飲料の主成分である糖分のスクロース  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  (ナカライテスク製, Code 30403-84) と塩化ナトリウム (ナカライテスク製, Code 3120-34) を市水 5kg に溶解し、NaCl 濃度 0.1wt%, 0.2wt% に対し、スクロース濃度 2.0wt%~6.0wt% の範囲で 0.5wt% ずつ変化させた混合水溶液を用いた。実験条件を表 1 に示す。トルクデータはデータロガー (KEYENCE 製, NR-500, TH-08) を介し、サンプリング周期を 1 秒とし、PC に収集した。また、伝熱面に氷膜が形成され始めた時間を初期値とし、糖度を Brix 計 (ATAGO 製, RX-5000CX-Plus) を用いてサンプリング周期を 5 分で測定し、IPF を算出した。IPF = 25wt% 以上になると製氷を終了した。

Table 1 Experimental conditions

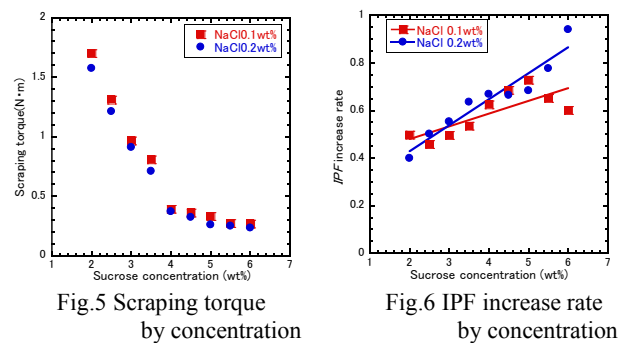
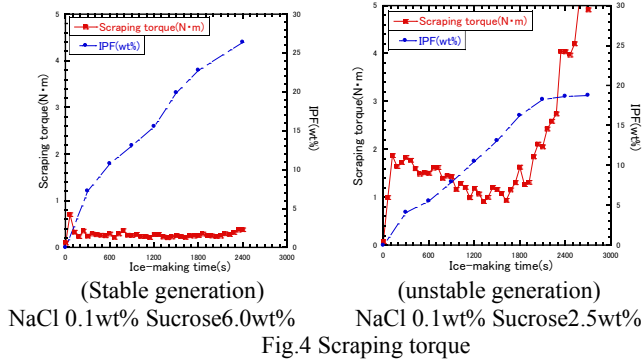
Aqueous solution volume(kg)	5
Scraping blade rotation speed( $\text{min}^{-1}$ )	600
Chiller set temperature( $^{\circ}\text{C}$ )	-10

#### 3.3 実験結果

水溶液の過冷却解放後、5 分間のデータをトルク値とした。スクロース濃度 2.0~3.0wt% の水溶液では NaCl 濃度に関係なく、IPF = 15~20wt% 付近でトルクが急激に増加する現象が見られ、スラリーアスを IPF = 25wt% 以上生成することができなかった(図 4)。各濃度の掻き取りトルクを図 5 に示す。掻き取りトルクの値は NaCl 濃度によらずスクロース濃度 4.0wt% を境界に傾向が変化していた。スクロース濃度 2.0~4.0wt% ではスクロース濃度が低下するに従い、掻き取りトルクは約 1.2N・m 増加していた。スクロース濃度 4.0~6.0wt% においては、掻き取りトルクほぼ一定の値になっていた。ま

た、NaCl 濃度によるトルク変化は NaCl 濃度 0.1wt%が NaCl 濃度 0.2wt%よりも掻き取りトルクは大きくなっていった

次に氷膜が形成されてから 5~25 分間における単位時間当たりの IPF 増加率と水溶液濃度の関係を見ると NaCl 濃度によらずスクロース濃度が高くなるに従い増加傾向となり、NaCl 濃度 0.1wt%よりも 0.2wt%のほうが増加傾向は大きかった。このことから水溶液濃度が高くなればスラリーアイスの生成効率が上がることがわかる(図 6)。



### 3.4 考察

スラリーアイスを生成するために用いる水溶液の濃度と製氷により伝熱面に形成される氷膜の関係は、水溶液の濃度が高くなるに従い、氷膜の形状は針状氷になることがこれまでの研究報告わかっている。また、水溶液の濃度が高くなるに従い、先端がより鋭利な針状になり、針状氷の間隔が広がる<sup>(3)</sup>。氷膜を掻き取り刃によって切削する際、氷膜の切削面ではせん断力が生ずる。氷膜が切削される時のせん断応力を  $\tau_{ice}$  [N/m<sup>2</sup>]、切削する力を  $F_{ice}$  [N] および切削断面を  $A_{ice}$  [m<sup>2</sup>] とすると

$$\tau_{ice} = \frac{F_{ice}}{A_{ice}} \quad (4-1)$$

となる。掻き取りトルク  $T_{blade}$  [N·m] と切削断面積  $A_{ice}$  [m<sup>2</sup>] 氷膜の破断応力と回転半径を一定と考えれば、

$$\frac{T_{blade}}{A_{ice}} = \text{const} \quad (4-2)$$

となり、掻き取りトルクは氷膜切削面の断面積に関係するといえる。このことから水溶液の濃度が高くなるに従い、掻き取りトルクの減少につながったと考えられる(図 7, 図 8)。

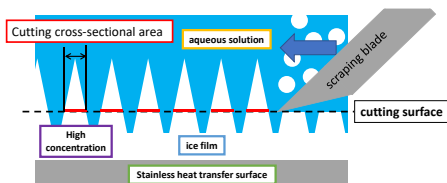


Fig. 7 High concentration ice film shape

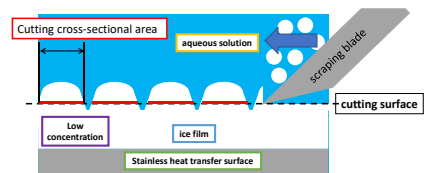


Fig.8 Low concentration ice film shape

水溶液濃度と IPF 上昇率について着目する。ジェネレータ一内の水溶液は対流伝熱によって冷却されている。伝熱面から流体の伝熱量  $Q$  [W] は、熱伝達率  $h$  [m<sup>2</sup>·K]、温度差  $\Delta T$ 、表面積  $A$  [m<sup>2</sup>] を用いて、

$$Q = h\Delta TA \quad (4-3)$$

となる。水溶液濃度上昇に従い氷膜は先端がより鋭利な針状になり、氷間の間隔も広がるため氷膜の表面積は増加する。式(4-3)より表面積の増加に伴い伝熱量も増加する。このことから濃度の高い水溶液の伝熱量は大きくなり、IPF 増加率が上がると考えられる。

次に濃度の低い水溶液で見られた、掻き取りトルクの急激な増加は、氷膜とステンレス伝熱面との滑り現象によるものであると考えられる。濃度の低い水溶液でスラリーアイスを製氷したとき、ステンレス伝熱面には伝熱面との付着力が高く安定している安定氷膜が形成され、濃度の高い水溶液を挟んで不安定氷膜が形成されると考えられる(図 9)。この不安定氷膜が削り取られるのではなく、掻き取り刃と不安定氷膜が共に回転してしまうと考えられる。しかし、氷膜内に水溶液が多く存在し、不安定氷膜が回転していることの実験的検証が今後の検討課題である。

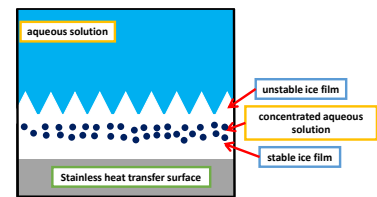


Fig.9 multilayer ice film

### 5. 結言

本研究では嚙下可能なワンバッチ式スラリーアイス生成装置の製作を目的として、閉空間でのスラリーアイス生成と NaCl 1.0wt%よりも濃度の低いスクロースと塩化ナトリウムが溶解している希釈水溶液からのスラリーアイス生成について検討を行った。NaCl 1.0wt%よりも濃度の低いスクロースと塩化ナトリウムが溶解している希釈水溶液からスラリーアイス生成は可能であり、擬似サンプルは実験的に用いることができることが分かった。希釈水溶液のスラリーアイス生成時の掻き取り負荷について、水溶液濃度が低くなるに従い掻き取りトルクは増加する傾向にあった。掻き取りトルクは切削断面積に比例すると考えられる。水溶液の濃度が高くなるに従い形成される氷膜は針状になり、切削断面積は減ることで掻き取りトルクは減少すると考えられる。また、低い濃度の水溶液での多層構造の氷膜における不安氷膜の回転現象については実験的検証が今必要である。

#### 参考文献

- (1) J González-Alonso, Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat, the American Physiological Society, (1999), pp.1033-1036
- (2) 松本泰典, スラリー生成技術を用いた凍結濃縮システムの開発, Fooma 技術ジャーナル(2016), 11(1), pp.37-41
- (3) 片岡遥渚, 単成分水溶液を用いた氷膜物性値の評価, 高知工科大学大学院知能機械工学コース(2021), pp.49