

スラリーアイスのダイレクト生成構造に関する研究

ものづくり先端技術研究室 1170107 永田聡

1. 諸論

生鮮魚介類の鮮度を高く保持するために、最も効果的な方法は、魚介類を凍結させずに、凍結温度にできるだけ近づけた低温領域にて保存することである。先行研究では塩分濃度 1wt% の NaCl 水溶液から氷充填率(以下、Ice Packing Factor : IPF)20~30%のスラリーアイスを生成することによって、魚介類の凍結しない-0.9~-0.8°Cでの冷却を可能とした。しかし、従来の装置は NaCl 水溶液をタンクと製氷機(以下、ジェネレーター)の間で循環することで、タンク内の氷粒子を増加させ、スラリーアイスを生成している。この循環方式では、短時間で生成が困難であること、またタンク内で貯蔵するため、氷粒子の凝集、侵入熱によりスラリーアイスの性状を維持できないなどの課題がある。

そこで、本研究では従来の装置からタンクを除いたスラリーアイスの生成技術の確立を目指しており、冷凍サイクルの蒸発器に相当するジェネレーター内で IPF ≥ 25% のスラリーアイスを生成し、性状を維持したまま、直接供給できる装置を開発するために、ジェネレーターの内部構造を実験的、解析的に検討することを目的とする。

2. 試作ジェネレーターによる実験

2.1 実験装置

実験装置を図 1 に示す。ジェネレーターの詳細は図 2 に示すように製氷部と氷送り出し部で構成され、製氷部は二重円筒になっており、二重円筒間に冷媒が循環し、内筒内に通過する NaCl 水溶液を冷却し、壁面に氷膜を形成させる。掻き取り刃とスクリューが 360min⁻¹ で回転し、掻き取り刃で氷膜を掻き取り、氷粒子を生成させ、スクリューで上部へ送り出す。

2.2 実験方法

塩分濃度 1wt% の NaCl 水溶液をジェネレーターに満水にした後、冷凍機、モーターを稼動する。氷膜が形成されてから 5 分間製氷した後、送液ポンプを稼働させ、スラリーアイスを生成した。氷送り出し部の出口配管内には閉子を設置し、掻き取り刃が回転することによる NaCl 水溶液の流出を防止するため、ポンプを稼動すると同時に閉子を抜いた。生成されたスラリーアイスの塩分濃度は 5 分毎に測定した。IPF は、予冷タンク内の NaCl 水溶液の濃度を初期塩分濃度として式(1)から算出した。また、冷凍機内の圧縮機、ジェネレーター、凝縮器それぞれの下流の冷媒温度、圧力を測定し、計算プログラムソフト¹⁾によって冷凍効果を求め、冷凍能力を算出した。なお、冷凍能力を加味した IPF (以下、計算値の IPF) を式(2)に示す。

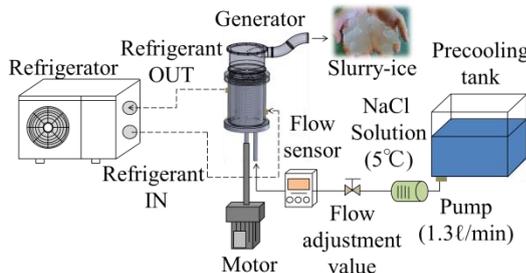


Fig.1 Experimental system overview

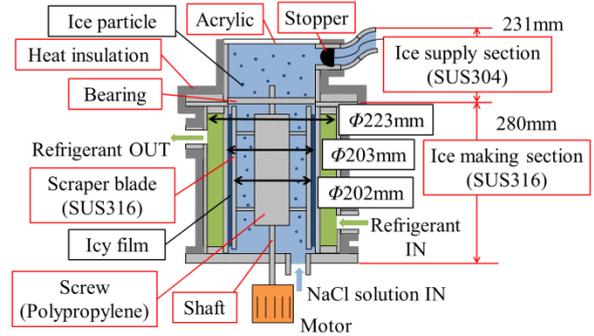


Fig.2 Details of the generator

$$IPF = 100 \left(1 - \frac{x_0}{x} \right) \quad (1)$$

x_0 : 初期塩分濃度(1wt%)

x : スラリーアイスの塩分濃度(wt%)

$$\gamma = \frac{6.0 \times 10^6}{\rho L} \left\{ \frac{Q_R - 6.47(T_2 - T_1) \times 10^{-3}}{\beta} - \frac{S(T_0 - T_{ice})}{60} \right\} \quad (2)$$

γ : 計算値の IPF(%), ρ : 氷の密度(916.8kg/m³), L : 潜熱(333.6kJ/kg), Q_R : 冷凍機の冷凍能力(kW), S : 水の比熱(4.18 kJ/kg°C), β : NaCl 水溶液の流入流量(1.3l/min), T_0 : 予冷タンク内の NaCl 水溶液の温度(5°C), T_1 : ジェネレーター内の温度(°C), T_2 : 雰囲気温度(°C), T_{ice} : 氷膜形成時のスラリーアイスの温度(凝固点降下²⁾より-0.589°C)

2.3 実験結果

生成されたスラリーアイスの IPF を図 3 に示す。製氷開始から 25 分後に最大値である IPF = 24% が生成され、それ以降 IPF が低下し、氷粒子によってジェネレーター内が閉塞したため実験を終了した。本実験での冷凍機の冷凍能力、ジェネレーター内の温度、雰囲気温度より計算値の IPF を求めると 35.5% であった。したがって、計算上では IPF ≥ 25% の生成が可能であるが、実際に生成されたスラリーアイスでは IPF < 25% であった。また、実験後にジェネレーター内を確認すると、氷送り出し部の出口配管内で氷粒子の塊が発生していた。

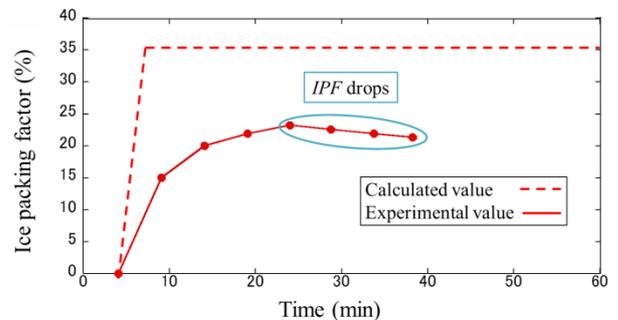


Fig.3 IPF of supplied slurry ice

2.4 考察

IPF ≥ 25% とならず、時間経過とともに IPF が下降した原因は、生成したスラリーアイスの氷粒子がジェネレーター内部で固着、蓄積することで、流入した NaCl 水溶液の冷却の妨げとなったためと考えられる。

3. 掻き取り刃軸受け下流についての検討

3.1 解析

3.1.1 目的及び条件

ジェネレーター内は目視できず、氷粒子蓄積の原因を予測することは困難である。そのため、ジェネレーター内部の流体解析を行い、内部の流動状態を予測し、氷粒子の蓄積箇所を判断した。その結果を反映させ、試作装置の改良を行い、実験を進めることにした。

しかし、スラリーアイスの物理的特性は不明な点が多いため、本解析では、ニュートン流体である水での解析を行った。解析条件は図4に示す。水を1.3ℓ/minで流入させ、掻き取り刃とスクリューを360min⁻¹で回転させた。解析範囲をx, y, z方向にそれぞれ70, 163, 257で分割し、解析精度向上のため、リファインレベル2を用いて格子サイズをx, y, z方向にそれぞれ0.725mm, 0.7375mm, 0.715mmとした。また、攪拌機の存在しない氷送り出し部では流速が落ちること、氷送り出し部の上流に軸受けを取り付けていることから、この部分で氷粒子が蓄積すると予測されるため、図5に示すような整流板を搭載し、整流板がない場合との比較を行った。

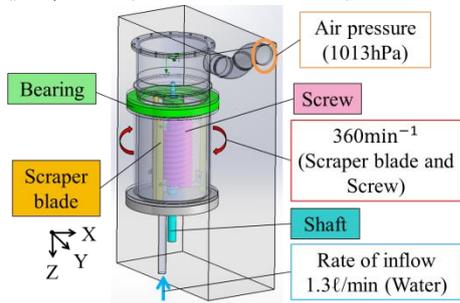


Fig.4 Analysis condition of the generator

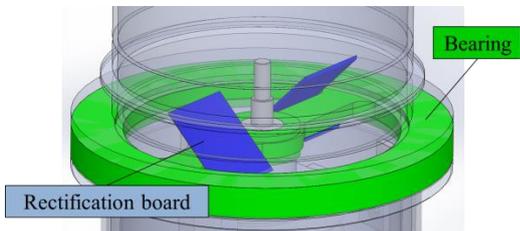


Fig.5 Rectification board on plastic fringe

3.1.2 解析結果

解析結果を図6に示す。整流板がない場合では、旋回流が軸受けによって氷送り出し部内への流入を妨げられていることが分かる。しかし、整流板を取り付けることで、氷送り出し部内において旋回流から上下流が発生していることが分かる。

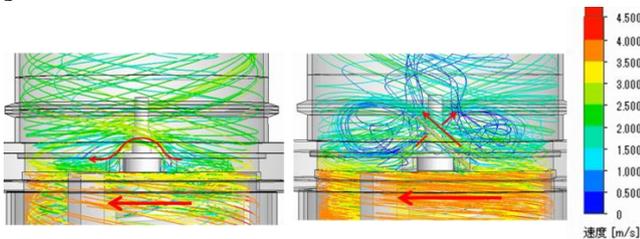


Fig.6 Analysis result

(Left : normal, right : attached rectification board)

3.2 試作ジェネレーターの改良による実験

3.2.1 実験条件

実験条件を表1に示す。条件①と②を比較することで、解析で確かめられた整流板の効果がスラリーアイスの性状にどう影響するのかを調べた。条件③と④では整流板に加えて、

その下流である氷送り出し部内の攪拌を促すため、図7に示す傾斜パドル、直角パドルをそれぞれシャフトの先端に取り付けた。なお、出口配管内で氷粒子が蓄積して実験が中断しないよう、氷送り出し部の出口配管内を間欠的に攪拌した。

Table 1 Experiment condition

Condition No.	Rectification board	Paddle
①	×	×
②	○	×
③	○	Slant
④	○	Vertical



Fig.7 Slant paddle(left) and vertical paddle(right)

3.2.2 実験結果と考察

各条件で生成されたスラリーアイスのIPFを図7に示す。条件①と②より、整流板を取り付けると、スラリーアイスをIPF \geq 25%で生成し、整流板が無い場合の約2倍の時間、生成できた。条件③と④より、氷送り出し部内を攪拌し、流速を上昇させても、条件①と同じ時間に氷粒子によってジェネレーター内が閉塞したため、実験を終了した。

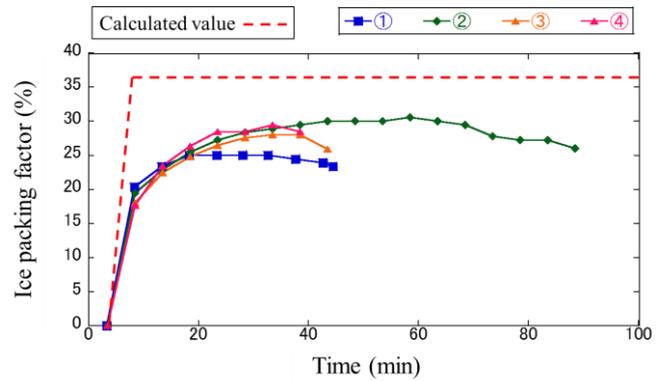


Fig.8 IPF of supplied slurry ice

解析と実験により、条件②でIPF \geq 25%のスラリーアイスを最も長い時間生成できたのは、整流板による上下流の発生が要因であり、氷粒子が軸受けで蓄積せず、氷粒子がNaCl水溶液の冷却の妨げとならなかったからだと考えられる。

4. 結言

解析により、整流板を取り付けることで上下流を発生させることを明らかにし、実験によって、上下流の発生がIPF \geq 25%のスラリーアイスを生成し、性状を維持した状態で安定した生成をし続けられることに有効であることが明らかとなった。今後の課題は、IPF \geq 25%のスラリーアイスを生成し、氷粒子の蓄積によるジェネレーター内の閉塞を防止しつつ、連続的に生成可能な内部構造の検討を行うことである。

参考文献

- 1) 冷凍サイクル計算プログラムソフト Ver.2 R404A
- 2) 松本泰典 希釈海水を用いたスラリーアイス生成技術の取り組みとその展開 第6回潜熱工学シンポジウム講演 pp.43-44 (2016)