

2023（令和 5）年度 修士学位論文

スラリーアイス生成装置における

高IPF安定生成法の構造検討

Study on the Structure of High IPF Stable Generation
Method in Slurry Ice Generator

2024年2月28日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1265017 前田真也

指導教員 松本 泰典

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 水産業の状況.....	1
1.2 スラリーアイスの優位性.....	1
1.3 スラリーアイス生成装置.....	3
1.4 研究目的	5
1.5 実験装置の概要.....	5
1.6 <i>IPF</i> 測定方法.....	6
第 2 章 実験装置の現状把握	9
2.1 目的	9
2.2 実験方法及び実験条件.....	9
2.3 実験結果	9
2.4 考察	12
第 3 章 1 段攪拌翼による製氷実験	14
3.1 目的	14
3.2 実験方法及び実験条件.....	14
3.3 実験結果	16
3.4 考察	19
第 4 章 2 段攪拌翼による製氷実験	20
4.1 目的	20
4.2 実験方法及び実験条件.....	20
4.3 実験結果	23
4.4 考察	26
第 5 章 結論	31

参考文献

謝辞

第1章 緒論

1.1 水産業の状況

水産業は燃油や資材の高騰、漁獲量の減少、漁業者の減少など長年厳しい状況が続いている。この背景には、近年のロシア・ウクライナ情勢の影響や急速な円安、海水の温度上昇などの環境変化、少子高齢化、過疎化などがあげられる。こうした状況が今後も続けば、漁村の荒廃や漁業の衰退につながる恐れがある。そこで、国による各漁村地域の漁業所得を5年間で10%向上させることを目標に掲げた「浜の活力再生プラン」が推進されている⁽¹⁾。これは様々な漁法、多様な魚介類が存在する日本で、トップダウンによる画一的な政策ではなく、漁業者自らが地域ごとの実情に即した具体的な解決策を考え、実施するものである。取り組みは収入向上、コスト削減の両面から行われており、漁獲量増大、品質向上、省燃油活動などがある。その中の品質向上に着目すると、活締め・神経締め・血抜き等による高鮮度化、活魚出荷などが行われている。これらに加え注目されているのがスラリーアイスの活用である。

1.2 スラリーアイスの優位性

スラリーアイスは、主に生鮮魚介類の鮮度保持に用いられており、約 0.1mm の微細な氷粒子とエタノールや塩化ナトリウムなどを溶質とする水溶液が混在した懸濁液である⁽²⁾。本研究では魚介類の体内に含まれている塩化ナトリウムを溶質とした水溶液を使用している。また、スラリーアイスの温度は表 1-1 に示すように塩分濃度と氷充填率(以下、*IPF*: *Ice Packing Factor*)で決定され、表 1-2 に示した生鮮魚介類の凍結温度に合わせて、生鮮魚介類を凍結させる直前の温度に調整することが可能である。この温度を維持することで魚介類を冷凍状態にすることなく、魚介類が冷凍状態から解凍されたときに出るドリップと呼ばれるうまみ成分を多く含んだ組織液の流出を抑えることができる。実際に凍結温度が-1.0°Cのサバを用いて鮮度実験を行い、体内温度の経時変化を調べた結果を図 1-1 に示す。スラリーアイスと一般的な冷却保存に用いられる海水氷にそれぞれ 5 匹ずつ、漁獲した直後のサバの腹腔部に温度センサーを設置して冷却し、サバの体内温度が 1°Cになるまでの時間を比較するとスラリーアイスが早く達していることが分かる。これは、スラリーアイスの氷粒

子が微細なため、魚介類の体表面に接する面積すなわち氷粒子の潜熱の影響が海水氷よりも大きくなったからである。また、海水氷で冷却したサバの体内温度は1時間を超えた辺りから上昇しているのに対して、スラリーアイスではサバの体内温度は-1°C付近を維持している。これについては、氷粒子が微細であると粒子間に水溶液が保持されることで、海水氷と比較して高さ方向でより一様に氷が存在しているためである。

表 1-1 塩分濃度と氷充填率から決定されるスラリーアイスの温度

Salinity [wt%]	Ice Packing Factor[wt%]					
	0	10	20	30	40	50
3.5(Seawater)	-2.2	-2.5	-2.8	-3.2	-3.7	-4.5
3.0	-1.9	-2.1	-2.4	-2.7	-3.2	-3.8
2.5	-1.6	-1.8	-2.0	-2.3	-2.6	-3.2
2.0	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-2.1	-2.5
1.5	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6	-1.9
1.0	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.1	-1.3
0	0	0	0	0	0	0

温度[°C]

表 1-2 生鮮魚介類の凍結温度^③

魚種	凍結温度[°C]	魚種	凍結温度[°C]
タラ	-1.0	ヒラメ	-1.3
サバ	-1.0	タイ	-1.5
アジ	-1.0	ウナギ	-2.0
ブリ	-1.2	カレイ	-2.0
マグロ	-1.3	カツオ	-2.0
サンマ	-1.3	カニ	-2.0
イワシ	-1.3	イカ	-2.3

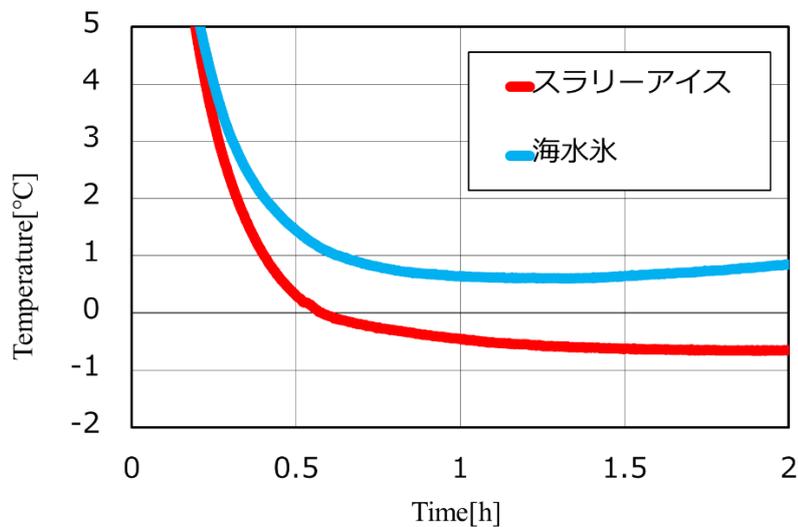


図 1-1 サバの体内温度の経時変化

1.3 スラリーアイス生成装置

一般に事業化されているスラリーアイス生成装置は、図 1-2 に示すように製氷機と貯蔵タンクで構成された循環方式である。希釈海水または塩化ナトリウム水溶液からスラリーアスを生成するには、まず貯蔵タンクの水溶液をポンプで製氷機内に送液する。製氷機は図 1-3 のように二重円筒構造となっており、円筒間に冷媒を流入させることで、内筒内部に送液された水溶液が内筒内壁の伝熱面により冷却される。水溶液の温度が凝固点に達すると伝熱面に氷膜が形成される。そして、氷膜が成長し内筒内部で回転している掻き取り刃の先端と接触することにより水溶液中に氷粒子が浮遊する。製氷機内で水溶液と氷粒子が混在したスラリーアスは、シャフトに設置されているスクリーによる上昇流にて、製氷機の上部から貯蔵タンクに移送される。貯蔵タンクでは、水溶液のみを再び製氷機内に送液する。この循環を繰り返すことで、貯蔵タンク内のスラリーアスの *IPF* を高めていき、目標の濃度になると運転を停止する。この循環方式は、生成可能なスラリーアスの量がタンク容積で決定される。このため、日々変化する漁獲量に対して、常に適量のスラリーアスを生成しておくことが難しい。また、長期間にわたりスラリーアスを貯蔵タンクに保管すると、外部からの侵入熱の影響で氷粒子が融解と再凝固を繰り返し、氷粒子同士が結合して氷塊へと成長してしまう⁽²⁾。このことから近年、既存の循環方式を使用している水産業界からスラリーアイスに含有する氷粒子が生成直後の状態を維持できる貯蔵タンクの開発が求められている。本研究室では、生成直後のスラリーアスを需要

に合わせた提供が可能な製氷機の研究開発を進め、貯蔵タンクを必要とせず水溶液を製氷機に通過させることで生鮮魚介類の鮮度保持に用いられる $IPF=30wt\%$ のスラリーアイスが得られるダイレクト製氷方式の開発に成功している。

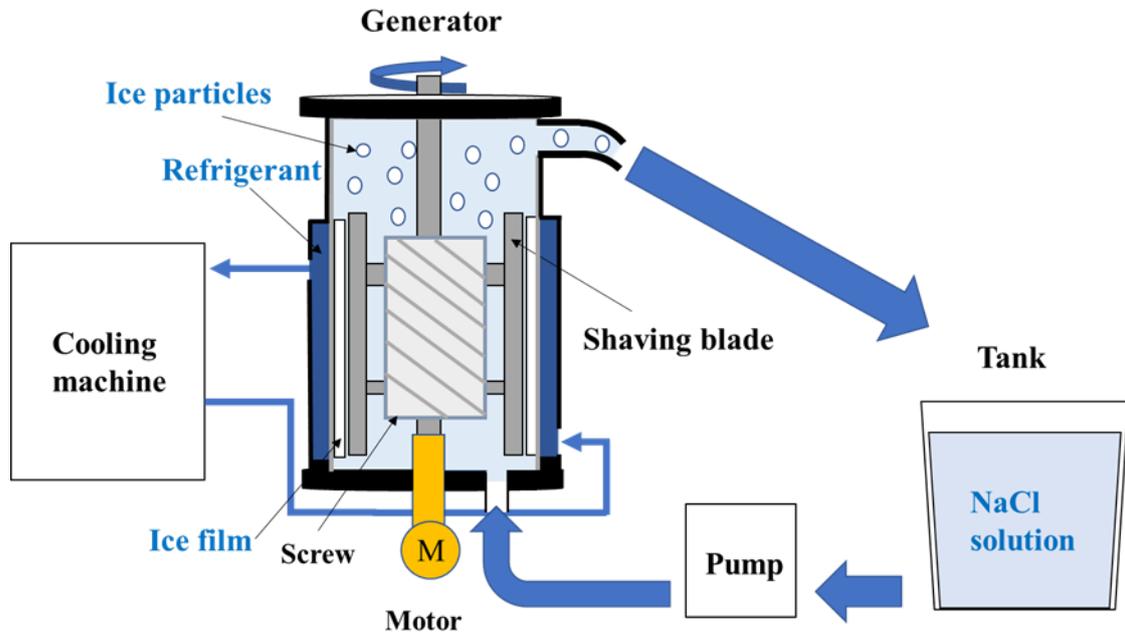


図 1-2 スラリーアイス生成装置

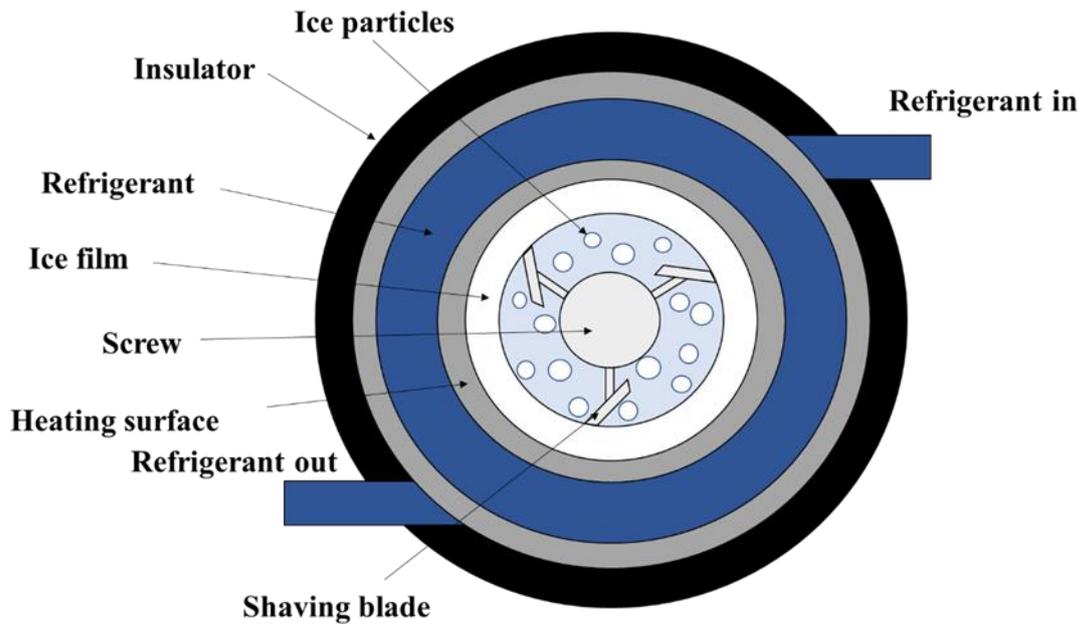


図 1-3 製氷機内部

1.4 研究目的

スラリーアイスとは生鮮魚介類の鮮度保持に用いられるが、スラリーアイスは高い温度維持機能を有し、多少の熱の出入りがあってもスラリーアイス中に氷粒子が存在する限りは、その高い熱負荷追従性により温度は変化しない⁽²⁾。そのためスラリーアイスの IPF を高めることが生鮮魚介類を長距離輸送するときなどに重要となる。したがって、より高 IPF のスラリーアイスを生産できる製氷機が次世代の装置として期待されている。本研究では高 IPF スラリーアイスを実験的に生成し続ける装置の開発を目的とする。高 IPF スラリーアイスとして、 $IPF = 50\text{wt}\%$ に設定する。これは均一球の基本配列である単純立方格子の充填率 52%に近い値であり、流動性を保つスラリーアイスの最大値になると考えられるためである。

1.5 実験装置の概要

ダイレクト製氷方式に基づいた実験装置は、図 1-4 に示すように製氷機、冷凍機、モーター(三菱電機, GM-SPF 1.5kW 1/3)、ポンプ(TACMINA, BPL-1-VTCF-MWS)、予冷タンクで構成されている。実験装置の生成フローは、設定温度に冷却された予冷タンク内の塩水をポンプで製氷機に送液し、連続的にスラリーアイスを生産するものである。ポンプの流量、モーターの回転数はインバーター(三菱電機, FR-D720-0.75K)によって制御した。予冷タンク内の塩水はチラーユニット(第一工業株式会社, FSC-X101ABT-S)を用いて設定温度まで冷却した。

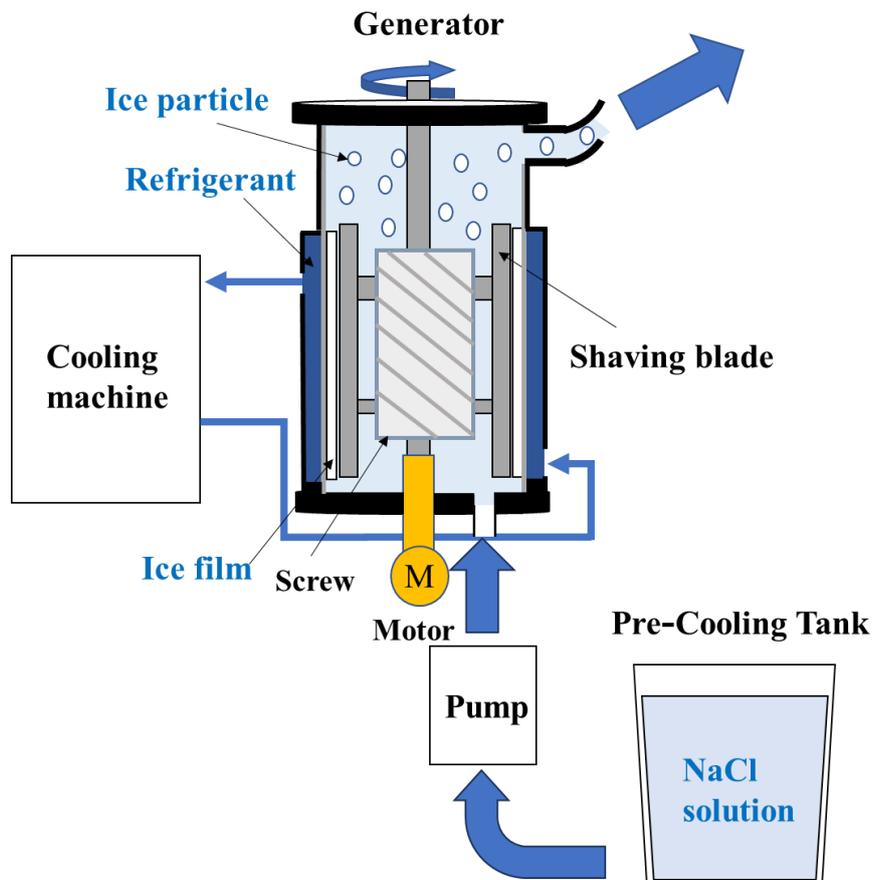


図 1-4 実験装置

1.6 IPF測定方法

IPFの測定方法として、塩分濃度を計測しIPFを算出する方法がある。製氷に用いる NaCl 水溶液の塩分濃度 x_0 [wt%]は、水溶液中の NaCl の質量 m_0 [kg]、水の質量 M_0 [kg]から

$$x_0 = 100 \cdot \frac{m_0}{M_0 + m_0} \quad (1.1)$$

と表される。ここで、 M_0 について整理すると、

$$M_0 = 100 \cdot \frac{m_0}{x_0} - m_0 \quad (1.2)$$

となる。また、製氷から T [h]経過した水溶液の塩分濃度 x_T [wt%]は、水溶液中のNaClの質量 m_T [kg]、水の質量 M_T [kg]とすると、

$$x_T = 100 \cdot \frac{m_T}{M_T + m_T} \quad (1.3)$$

で表される。したがって、 M_T は

$$M_T = 100 \cdot \frac{m_T}{x_T} - m_T \quad (1.4)$$

となる。スラリーアイス中の氷粒子は純水であり、水溶液中に溶解しているNaClの質量は変化しないので、

$$m_0 = m_T \quad (1.5)$$

である。製氷後の氷粒子の質量を M_{ice} [kg]としたとき、水の質量 M_T [kg]は、

$$M_T = M_0 - M_{ice} \quad (1.6)$$

で表される。ここで製氷後の IPF [wt%]は、溶液全体の氷粒子の割合なので、

$$IPF[\text{wt}\%] = 100 \cdot \frac{M_{ice}}{M_T + m_T + M_{ice}} \quad (1.7)$$

となる。式(1.5)、(1.6)を用いると、

$$IPF[\text{wt}\%] = 100 \cdot \frac{M_{ice}}{M_0 + m_0} \quad (1.8)$$

となる。また、式(1.2)、(1.4)、(1.5)、(1.6)より氷粒子の質量は、

$$M_{ice} = 100 \cdot \frac{m_0}{x_0} \left(1 - \frac{x_0}{x_T}\right) \quad (1.9)$$

である。従って、式(1.1)、(1.8)、(1.9)より、

$$IPF[\text{wt}\%] = 100 \left(1 - \frac{x_0}{x_T}\right) \quad (1.10)$$

となり、初期塩分濃度 x_0 [wt%]及び製氷後の塩分濃度 x_T [wt%]を測定することにより、 IPF [wt%]を求めることが可能である⁽⁴⁾。

式(1.10)を用いるために、スラリーアイスの塩分濃度を調べるには、図 1-5 に示すようにまず漏斗にろ紙を被せてその上からスラリーアスを投入し、固液分離を行い、ろ紙を透過した NaCl 水溶液の塩分濃度を塩分濃度計で測定する。

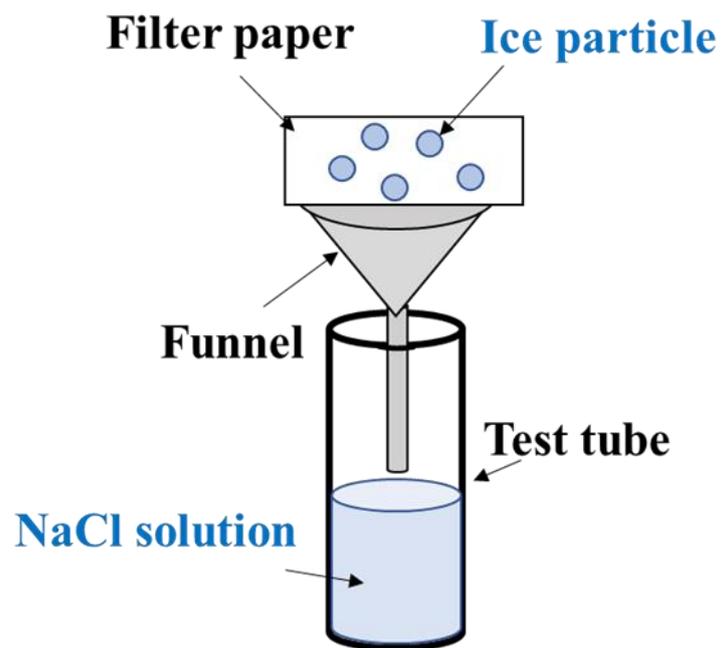


图 1-5 IPF测定方法

第2章 実験装置の現状把握

2.1 目的

本実験装置を使用した先行研究⁽⁵⁾では、製氷機内へ送液する塩水の流量を 1L/min に設定し、冷凍機の製氷能力を一定の状態での製氷実験を行っていた。本研究では冷凍機の冷凍能力は先行研究と同じく一定とし、流入流量を変化させることで高 IPF スラリーアイスが生成可能になると推察した。本実験では流入流量を変化させ実験装置で現状生成可能な高 IPF スラリーアイスの把握を目的とした。さらにモーターの回転数を変化させ、回転数と IPF の関係についても把握することとした。

2.2 実験方法及び実験条件

まず、5°Cまで冷却した予冷タンク内の塩水をポンプによって、製氷機に送液した。製氷機内を塩水で満たし、ポンプを停止後、モーター、冷凍機を稼働させ、製氷、攪拌を行った。モーターの回転数はインバーターによって、 500min^{-1} に設定した。製氷機内壁面に氷膜が形成されると、掻き取り刃によって切削を開始する。そして1分経過後ポンプによって予冷タンク内から製氷機内へ塩水を一定流量で連続的に送液した。流入流量はポンプに接続したインバーターによって、 $0.3\text{L}/\text{min}\sim 1.0\text{L}/\text{min}$ の範囲内で $0.1\text{L}/\text{min}$ 毎に設定した。製氷機から生成されたスラリーアスを5分間隔でサンプリングした。スラリーアイスはろ紙(大王製紙、プロワイプ SS220)を用いて固液分離し、塩分濃度計(ATAGO, PAL-SALT)で塩分濃度を計測し IPF を算出した。ただし、モーターの回転数と IPF の関係を求める実験では、回転数を $300\text{min}^{-1}\sim 500\text{min}^{-1}$ の範囲内で 100min^{-1} 毎に設定し、流入流量は $0.4\text{L}/\text{min}$ とした。

2.3 実験結果

図 2-1 にポンプから送液される塩水の流量と製氷機内 IPF の関係を示す。測定時間は3時間とし、流入流量 $0.5\text{L}/\text{min}\sim 1.0\text{L}/\text{min}$ では設定時間まで IPF を測定した。 $0.3\text{L}/\text{min}$, $0.4\text{L}/\text{min}$ ではそれぞれ35分後、40分後に製氷機内で氷粒子の閉塞が発生し製氷を停止した。 IPF の経時変化として、測定開始10分まで流入流量に関わらず同じ傾向を示した。測定開始15分~20分以降流入流量が小さくなるにつれ、大きくなる傾向を示した。その後、測定開始55分~60分で一定もしくは上昇する傾向を示した。最大上昇幅として、流

入流量 0.7L/min において測定開始 60 分～180 分で 5.91wt%であった。各流入流量における製氷機内の最大IPFを表 2-1 にまとめる。0.9L/min と 1.0L/min では異なるものの流入流量が増すにしたがい最大IPFが高くなる傾向となった。0.3L/min, 0.4L/min で閉塞したときのIPFは、0.5L/min の最大IPF =45wt%とほぼ同じ値となった。図 2-2 にモーターの回転数とIPFの関係を示す。測定時間は、 300min^{-1} , 400min^{-1} , 500min^{-1} でそれぞれ 25 分, 30 分, 40 分であり、その後製氷機内で氷粒子の閉塞が発生し製氷を停止した。回転数が大きくなるにつれ測定可能時間が延び、より高IPFなスラリーアイスを生じた。また、回転数の変化によって同経過時間においてIPFに差が見られ、回転数が大きくなるにしたがいIPFが低くなる傾向を示した。その差は 300min^{-1} と 400min^{-1} , 400min^{-1} と 500min^{-1} , 300min^{-1} と 500min^{-1} のそれぞれを比較すると最大 3.94wt%, 4.05wt%, 5.13wt%であった。図 2-3 に閉塞した製氷機内の画像を示す。塩水を除いた後、製氷機内を観察すると氷で満たされており、閉塞していることを確認した。

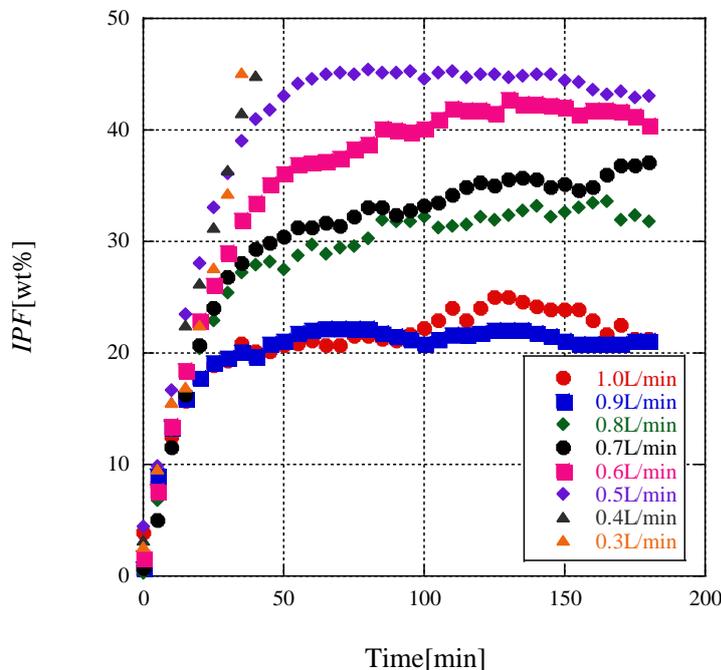


図 2-1 流量とIPFの関係

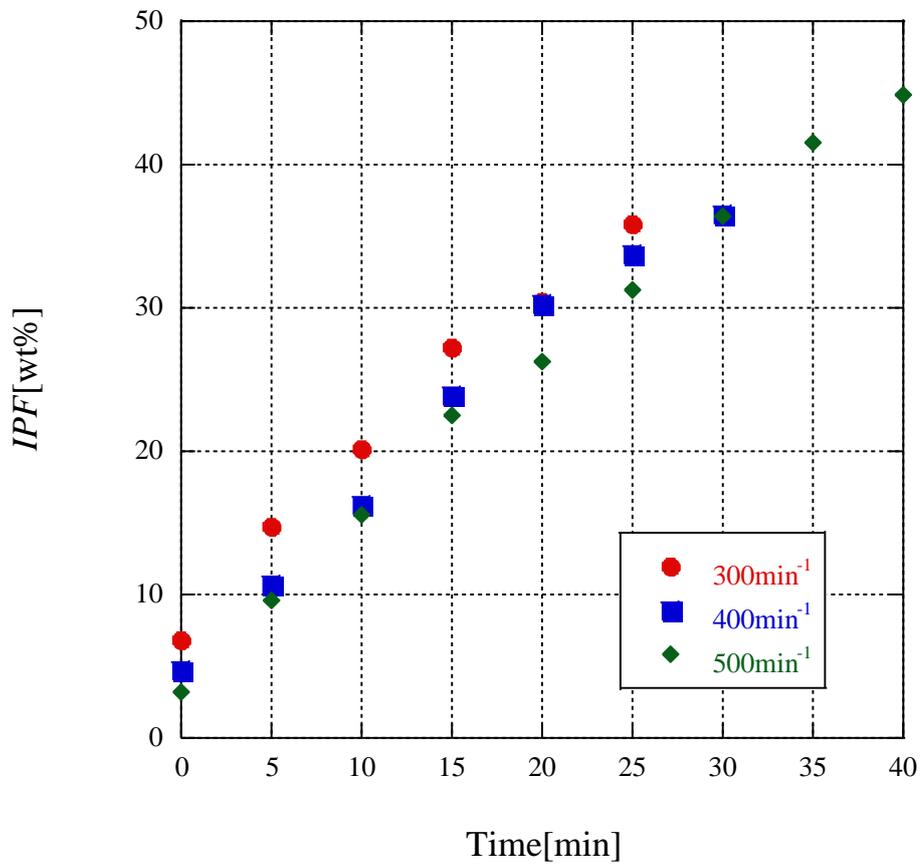


図 2-2 回転数とIPFの関係

表 2-1 各流入流量における最大IPF

流入流量[L/min]	最大IPF[wt%]
1.0	25.00
0.9	22.28
0.8	33.63
0.7	37.11
0.6	42.75
0.5	45.36
0.4	44.85
0.3	45.16



図 2-3 製氷機内閉塞発生(塩水抜水後)

2.4 考察

流入流量 0.3L/min, 0.4L/min における実験結果から得られた最大 *IPF* より, 現状の製氷機は *IPF* $\approx 45\text{wt}\%$ で閉塞が発生してしまうことが分かった. これはスラリーアイスの流動特性に起因していると考えられる. スラリーアイスは固液二相流であり固相の粒子径, 固相率, 流速などによりその流動様式が変化する. 流速が高い場合は均質浮遊流れとなり, 流速が低下するにつれて不均質浮遊流れとなり, さらに流速が低くなると氷粒子同士の付着によりクラスターを形成する塊状流れに変化し, 最終的に流路の閉塞に至り, 流動しなくなる⁽⁶⁾. 本実験でも同様の現象が製氷機内で起こり, *IPF* $\approx 45\text{wt}\%$ という高 *IPF* で閉塞が発生したと考えられる. また, 図 2-2 より高回転数ほどスラリーアイスは長時間生成可能であることが分かる. これは, 回転数の上昇によって攪拌力が増加し閉塞の発生を抑制したと考えられる. それに対して同経過時間での *IPF* は高回転数ほど低下していることが分かる. これは, 攪拌混合による侵入熱が高回転数ほど増加しているためである. 攪拌力を増加させるときには侵入熱増加の影響を考慮する必要がある.

次に閉塞発生場所について着目する. 製氷機の断面を図 2-4 に示す. 氷粒子を生成する製

氷部の上部にはスラリーアイスを一様混合させるための氷送り出し部が存在する。製氷部に対して氷送り出し部では攪拌機能がないため、*IPF*の上昇に伴い流速が低下し閉塞が発生していると考えられる。そのため目標*IPF*の達成には氷送り出し部に攪拌機構を設置することが有効であると考えられる。

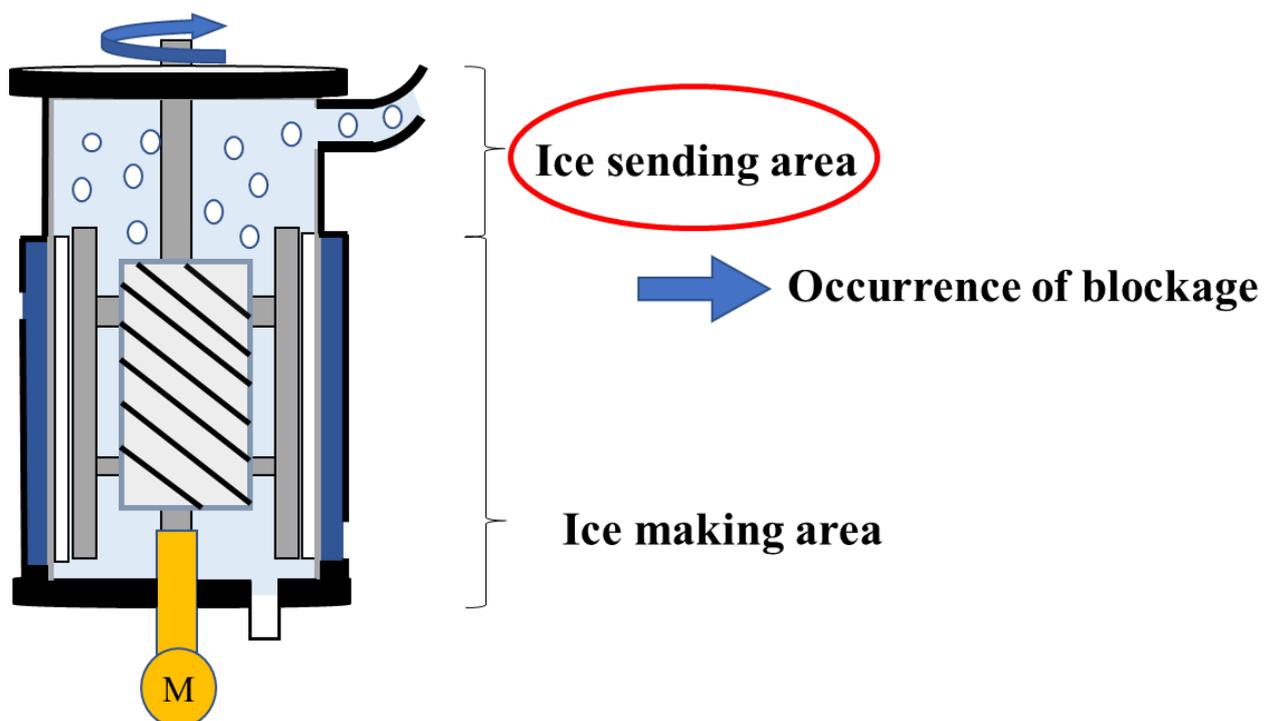


図 2-4 製氷機の断面

第3章 1 段攪拌翼による製氷実験

3.1 目的

前章の実験より氷送り出し部に攪拌機構を設置する方向性を見出した。そこで、氷送り出し部に攪拌翼を設置し攪拌力を増大させ、閉塞の発生を防ぐこととした。攪拌翼の形状はパドル翼とした。その選定理由は一般的な攪拌装置に広く用いられていること、文献が多数存在し有効であると判断したからである。本実験では、攪拌翼を用いて製氷機内の氷送り出し部における閉塞の抑制を目的とし、パドル翼の羽根角度を変化させ最適な攪拌翼を見出すこととした。

3.2 実験方法及び実験条件

パドル翼を図 3-1 に示す。羽根部とそれを固定する羽根固定部で構成されている。羽根部は自作しており、羽根固定部は TOPPAN 株式会社と共同製作したものである。パドル翼は製氷機内のシャフトに設置し、設置位置は氷送り出し部流出口の中心付近である。パドル翼の構成部品を図 3-2 に示す。構成部品①と②の円周方向には 4 か所等間隔に開けた穴がある。構成部品②の穴にはねじ山を切っており、シャフトへのパドル翼の固定は、構成部品①を挟んでそのねじ山にボルトを締め込むことで行った。構成部品④は羽根部であり、円盤、長ナット、羽根で構成されており、構成部品⑤とボルトを用いて固定した。円盤外周端に長ナットを 4 か所円周方向に等間隔に溶接した。羽根は溶接した長ナットと六角ボルトで固定した。その際、製氷中に羽根角度のズレが生じないように羽根固定部両端に S ワッシャーを挟んだ。パドル翼の寸法を図 3-3 に示す。

実験方法については、まず 5℃まで冷却した予冷タンク内の塩水をポンプによって、製氷機に送液した。そして、製氷機内を塩水で満たし、ポンプを停止後、モーター、冷凍機を稼働させ、製氷、攪拌を行った。モーターの回転数はインバーターによって、 500min^{-1} に設定した。製氷機内壁面に氷膜が形成されると、掻き取り刃によって切削を開始する。そして 1 分経過後ポンプによって予冷タンク内から製氷機内へ塩水を一定流量で連続的に送液した。流入流量はポンプに接続したインバーターによって、 $0.3\text{L}/\text{min}\sim 0.5\text{L}/\text{min}$ の範囲内で $0.1\text{L}/\text{min}$ 毎に設定した。製氷機から生成されたスラリーアイス を 5 分間隔でサンプリングした。スラリーアイスはろ紙(大王製紙、プロワイプ SS220)を用いて固液分離し、塩分濃度

計(ATAGO, PAL-SALT)で塩分濃度を計測し IPF を算出した。本実験では攪拌翼の羽根角度を変化させることで氷送り出し部内の流動形態を変化させ、最適な攪拌翼を見出すこととした。攪拌翼の羽根角度について図 3-4 に示す。羽根角度は水平面から時計回りに 30° , 45° , 60° , 90° の 4 通りである。この条件と設定した各流入流量の組み合わせでそれぞれ製氷実験を行った。なお、氷送り出し部の寸法は内径 208mm, 高さ 210mm であり、蓋部分は透明なアクリル板を使用している。

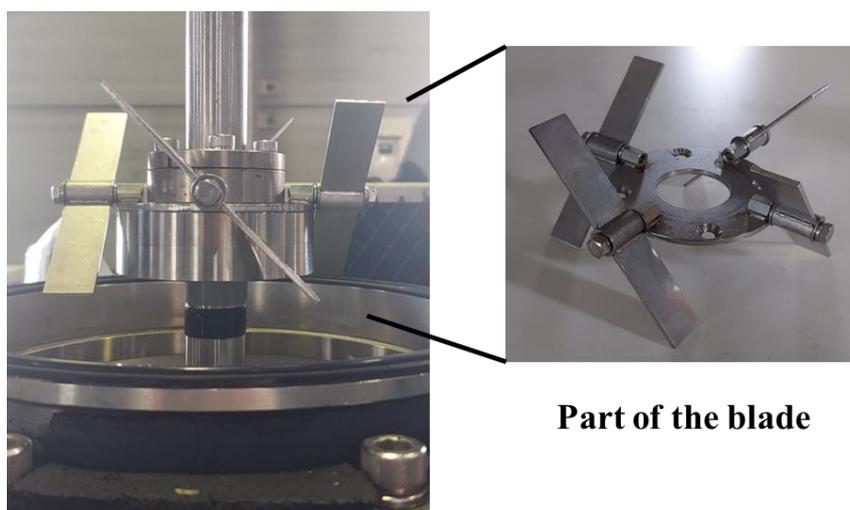


図 3-1 パドル翼 設置状態

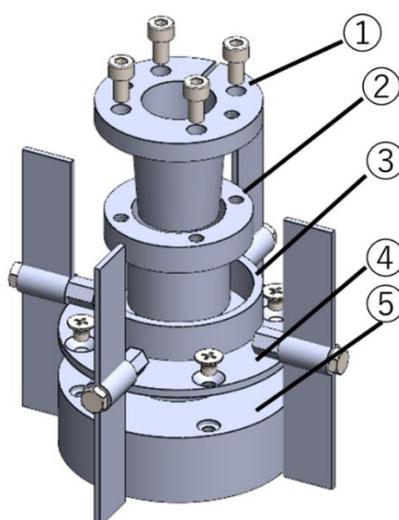


図 3-2 パドル翼の構成部品

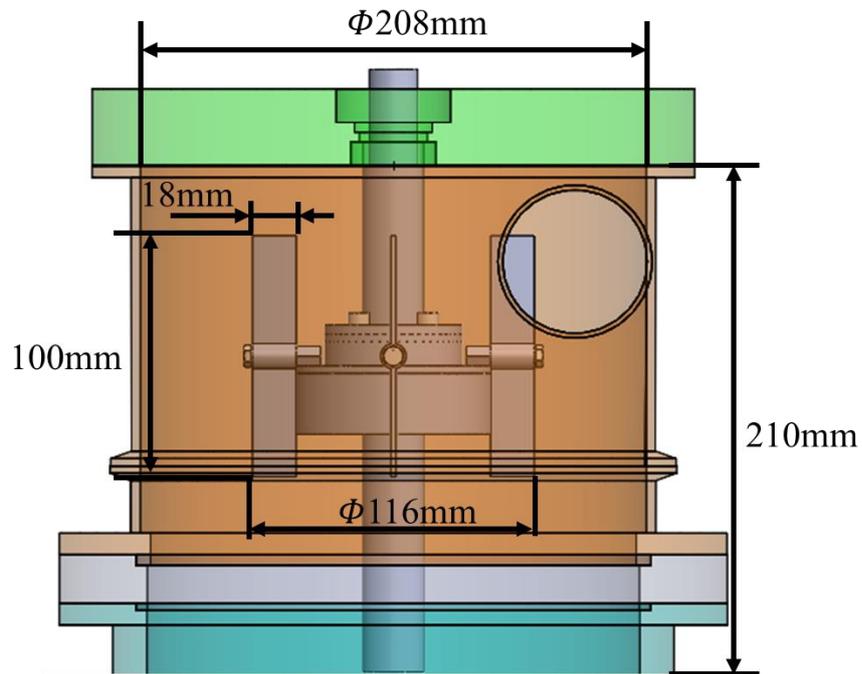


図 3-3 パドル翼の寸法

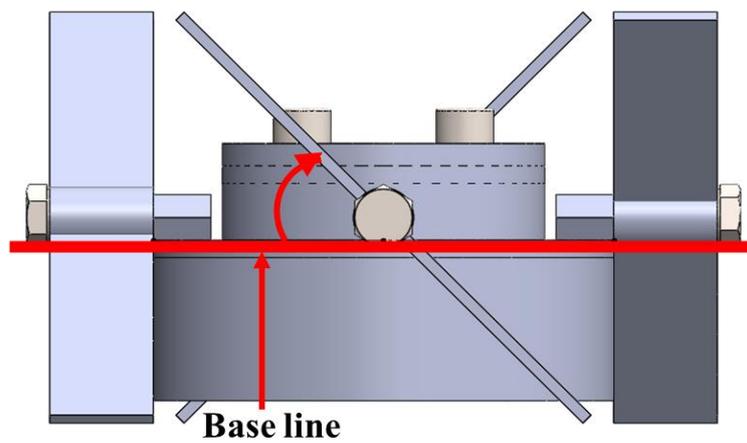


図 3-4 パドル翼の羽根角度

3.3 実験結果

各流入流量におけるスラリーアイスのIPF変化を図 3-5～図 3-7 にそれぞれ示す。測定時間は3時間としたが、0.3L/minにおいては羽根角度 30° 、 45° 、 90° で測定開始40分後、

60° では測定開始 45 分後に製氷機内で閉塞が発生し製氷を停止した。0.4L/min においては羽根角度 60° , 90° で測定開始 45 分後, 30° で測定開始 50 分後, 45° で測定開始 55 分後に製氷機内で閉塞が発生し製氷を停止した。0.5L/min においてはすべての羽根角度で設定時間まで製氷を行った。各流入流量における最大 *IPF* は 0.3L/min では羽根角度 60° で *IPF*=48.36wt%であった。0.4L/min では羽根角度 45° で *IPF*=52wt%であった。0.5L/min では羽根角度 90° で *IPF*=48.1wt%であった。各流入流量において攪拌翼なしのデータと攪拌翼ありのデータを比較すると, 0.3L/min, 0.4L/min ではそれぞれ同様の傾向が得られた。0.5L/min においては測定開始 60 分以降異なる傾向が得られた。攪拌翼なしでは *IPF* が一定の傾向を示したのに対して羽根角度 30° , 45° , 60° ではそれぞれ測定開始 140 分, 110 分, 140 分以降 *IPF* が低下する傾向を示した。羽根角度 90° では測定開始 110 分以降 *IPF* が上昇する傾向を示した。

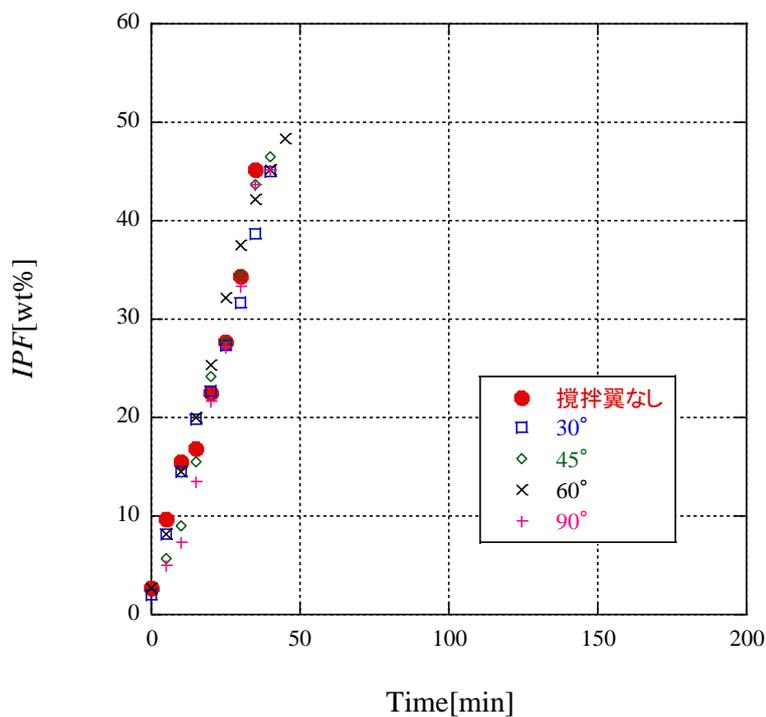


図 3-5 流入流量 0.3L/min における各羽根角度の *IPF* 変化

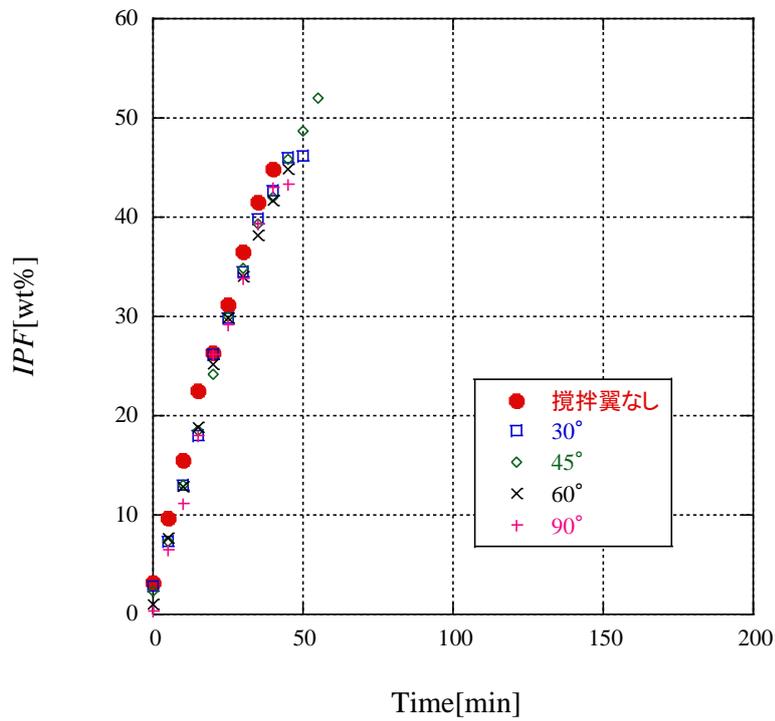


図 3-6 流入流量 0.4L/min における各羽根角度のIPF変化

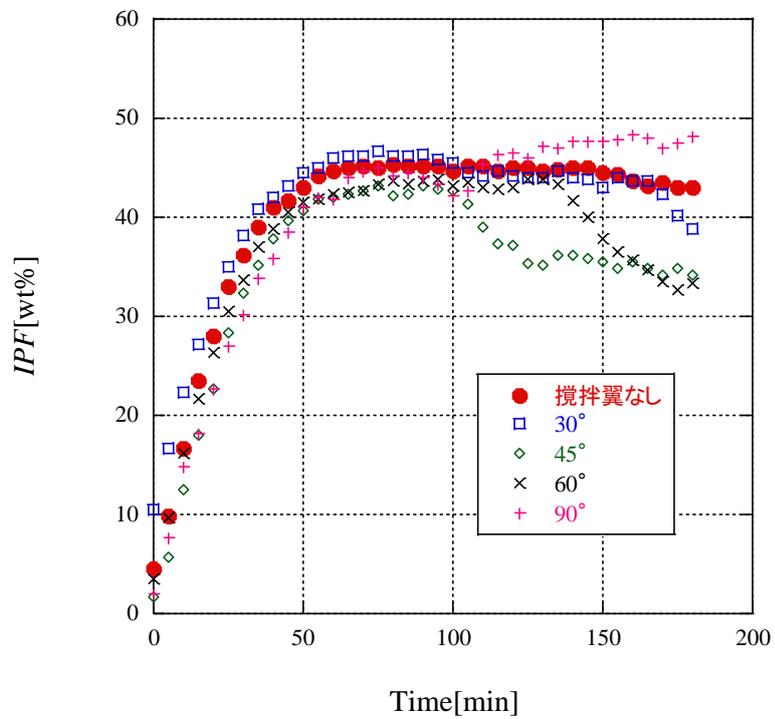


図 3-7 流入流量 0.5L/min における各羽根角度のIPF変化

3.4 考察

流入流量 0.5L/min における測定開始 60 分以降の各羽根角度の *IPF* 変化に着目する。羽根角度 30° , 45° , 60° では *IPF* が低下する傾向を示した。氷送り出し部に攪拌翼を設置していない状態での *IPF* が一定であることより、攪拌翼により氷粒子が融解したことが考えられる。しかし、羽根角度 90° では 105 分～180 分の間に *IPF* が上昇する傾向を示した。これを測定開始から 75 分間の *IPF* が上昇した傾向と比較すると、測定開始からの 75 分間では *IPF* 上昇が 0.57wt\%/min であるのに対して、105 分～180 分の 75 分間では 0.08wt\%/min である。これより、105 分～180 分の *IPF* 上昇は微小な変化であることが分かる。大きな *IPF* 変化であれば外的要因も考えられるが、本実験においては攪拌翼による氷粒子融解の影響が小さく、流動化促進のみが行われていたと考えられる。流入流量 0.3L/min , 0.4L/min については、製氷機内に攪拌翼を設置していない状態と同様の傾向を示した。流入流量 0.4L/min における羽根角度 45° のみ目標 *IPF* としていた $IPF \geq 50\text{wt\%}$ を達成した。これは、氷送り出し部の羽根角度毎の流動状態に起因すると考えられる。図 3-8 に羽根角度 45° と羽根角度 90° の氷送り出し部内における流動状態のイメージ図を示す。羽根角度 90° では旋回流のみを促進しているのに対して羽根角度 45° では旋回流に加えて上下循環流も促進している。他のパターンも含んだ 4 つの羽根角度の中で、 45° の旋回流と上下循環流のスラリーアイスに及ぼす影響の割合が最適であったと考えられる。

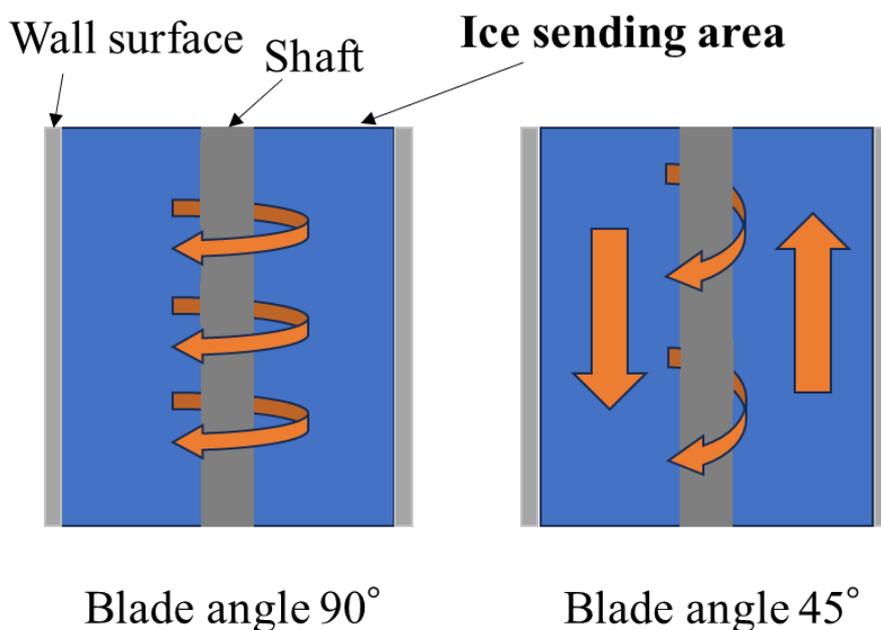


図 3-8 製氷機内部の流動状態

第4章 2 段攪拌翼による製氷実験

4.1 目的

前章の製氷実験より攪拌翼の羽根角度を調整することで $IPF=50wt\%$ のスラリーアイスの生成に成功した。しかし、 $50wt\%$ に到達した直後、閉塞が発生しその後の製氷が不可能となった。そこで、前章で用いたパドル翼の下部に新たな攪拌翼を設置した 2 段攪拌翼に変更し、攪拌力をさらに増大させ閉塞の発生を防ぐこととした。2 段目に用いる攪拌翼は前章と同様のパドル翼とした。製氷機内の氷送り出し部における閉塞の抑制を目的とし、1 段目、2 段目のパドル翼の羽根角度を変化させ最適な攪拌翼を発見するための製氷実験を行うこととした。

4.2 実験方法及び実験条件

まず、本実験に用いた 2 段攪拌翼について説明する。2 段攪拌翼を図 4-1 に示す。前項で述べたように 1 段攪拌翼(以下、上段翼)、それと同様のパドル翼(以下、下段翼)で構成されている。2 段攪拌翼は製氷機内のシャフトに設置し、高さを上段翼の羽根角度が 90° のとき羽根最上部と氷送り出し部上部の亚克力板との隙間が $4mm$ になる位置に調整した。(図 4-2 参照)下段翼を図 4-3 に示す。シャフトへの 2 段攪拌翼の固定方法は 1 段攪拌翼と同様である。1 段攪拌翼と 2 段目のパドル翼はステンレス鋼管を用いて接続した。ステンレス鋼管片断面にはフランジ板を溶接し、上段翼底面に円周方向に 4 か所等間隔に開けたねじ穴とボルトを用いて固定した。2 段目のパドル翼はステンレス鋼管のフランジ板が溶接された断面の反対側に溶接した。フランジ板には円周方向に 8 か所等間隔に穴を開けた。これにより、上段翼と下段翼の円周方向の羽根位置を同じ、 45° ズレの 2 パターンで行うことが可能である。(図 4-4 参照)

実験方法については、まず 5°C まで冷却した予冷タンク内の塩水をポンプによって、製氷機内に送液した。そして、製氷機内を塩水で満たし、ポンプを停止後、モーター、冷凍機を稼働させ、製氷、攪拌を行った。モーターの回転数はインバーターによって、 500min^{-1} に設定した。製氷機内壁面に氷膜が形成されると、掻き取り刃によって切削を開始する。そして 1 分経過後ポンプによって予冷タンク内から製氷機内へ塩水を一定流量で連続的に送液した。流入流量はポンプに接続したインバーターによって、 $0.4\text{L}/\text{min}$ に設定した。製氷機から

生成されたスラリーアイスを 5 分間隔でサンプリングした。スラリーアイスはろ紙(大王製紙, プロワイプ SS220)を用いて固液分離し, 塩分濃度計(ATAGO, PAL-SALT)で塩分濃度を計測し *IPF* を算出した。本実験では攪拌翼の羽根角度を変化させることで氷送り出し部内の流動形態を変化させ, 最適な攪拌翼を見出すこととした。下段翼の羽根角度についても上段翼と同様に, 水平面から時計回りに 30° , 45° , 60° , 90° の 4 通りである。この条件と上段翼の羽根角度 4 通り及び上段翼と下段翼の円周方向の羽根位置 2 通りを組み合わせた計 32 通りで製氷実験を行った。



図 4-1 2 段攪拌翼 設置状態

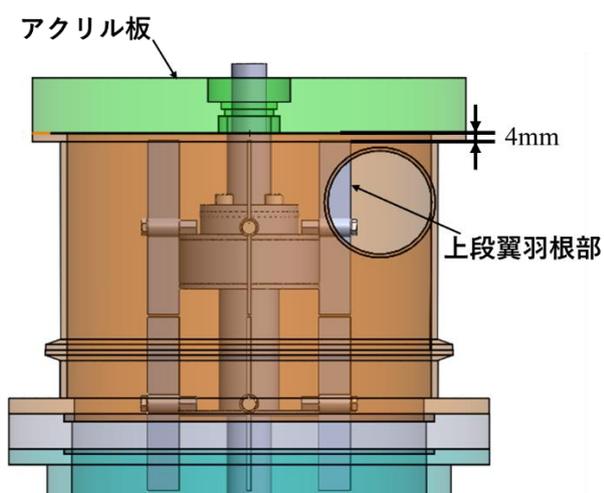


図 4-2 2 段攪拌翼 設置位置

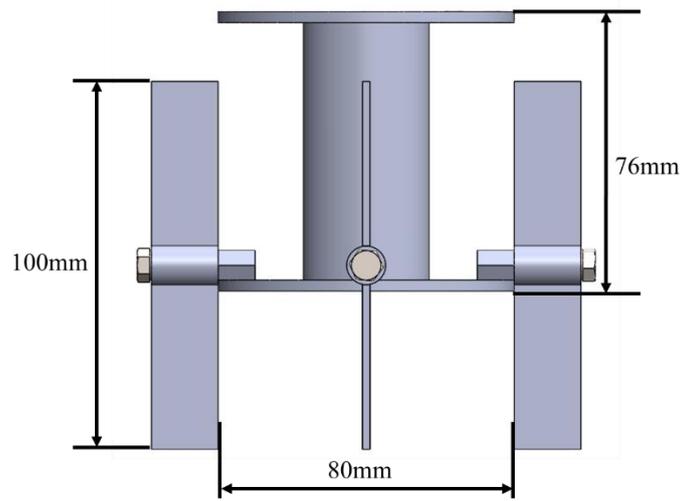
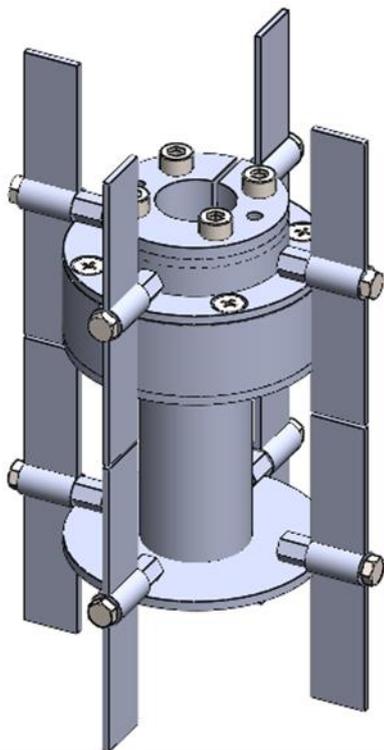
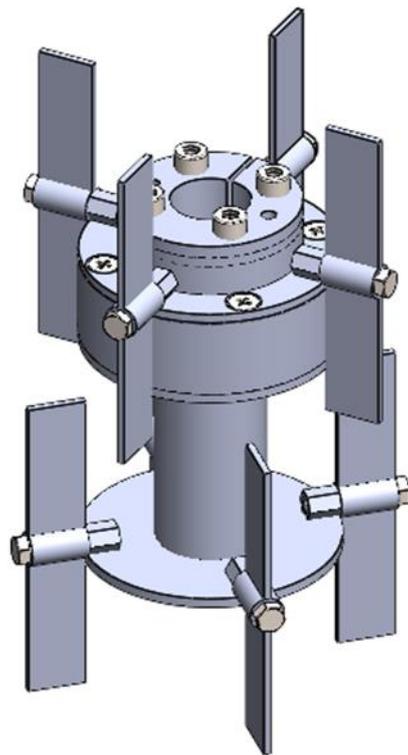


図 4-3 パドル翼の寸法



同じパターン

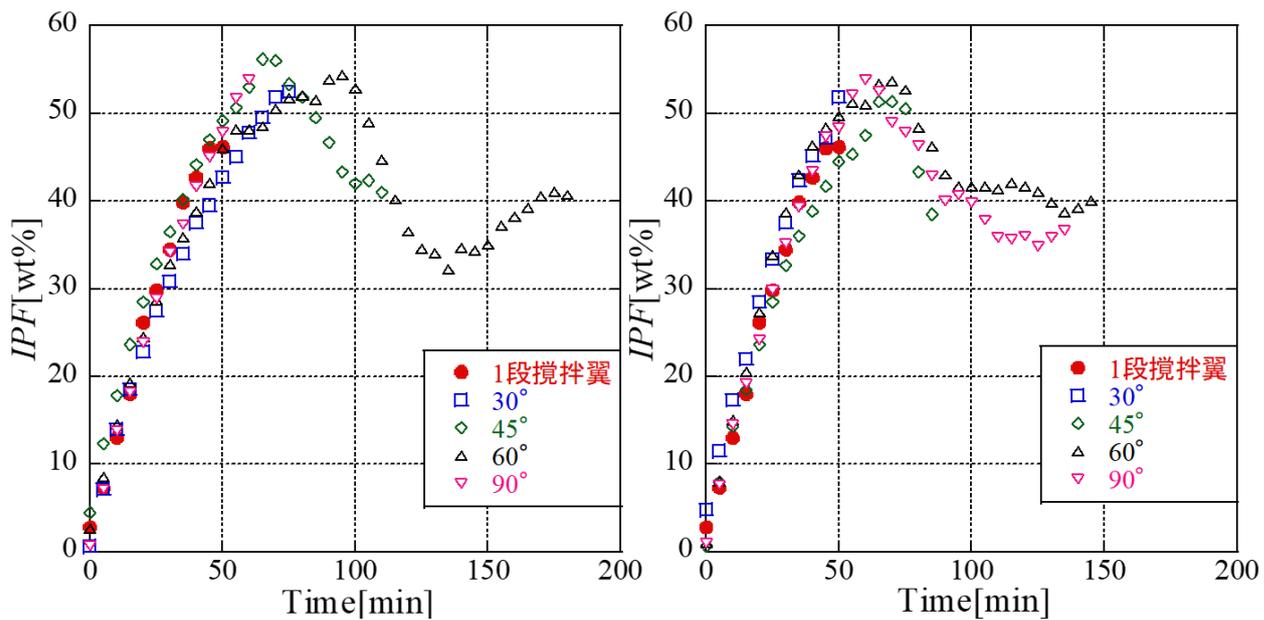


45° ズレパターン

図 4-4 円周方向の羽根位置

4.3 実験結果

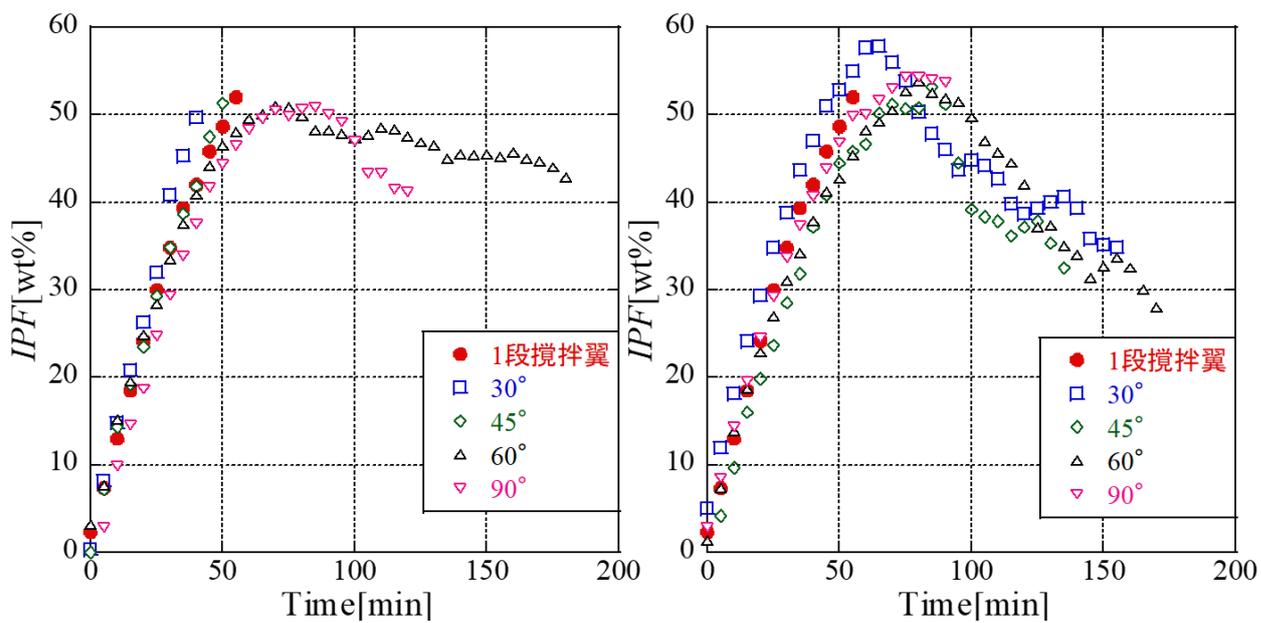
各組み合わせにおけるスラリーアイスのIPF変化を図 4-5～図 4-8 にそれぞれ示す。測定時間は3時間とした。各組み合わせにおける製氷機内の最大IPFを表 4-1 にまとめる。32 通り中 20 通りの組み合わせが目標IPFである $IPF \geq 50wt\%$ を達成した。上段翼の各羽根角度におけるIPFの経時変化は、羽根角度 30° では 50 分～70 分後に最大IPFとなり、その直後製氷機内で閉塞、もしくはIPFが低下していき 85 分～145 分後に閉塞という結果となった。しかし、下段翼羽根角度 60° で上下段翼の円周方向の羽根位置を同じにした組み合わせでは異なった傾向が得られた。測定開始から 95 分後まではIPFが上昇し、その後IPFが低下していった。ここまでは似た傾向であるが、135 分後再びIPFが上昇し3時間製氷し続けることができた。羽根角度 45° では 40 分～85 分後に最大IPFとなり、その直後製氷機内で閉塞、もしくはIPFが低下していき 120 分～170 分後に閉塞という結果となった。下段翼羽根角度 60° で上下段翼の円周方向の羽根位置を同じにした組み合わせのみ、測定開始から 70 分後までIPFが上昇し、その後は 110 分間で 8wt%程度の低下で3時間製氷し続けることができた。羽根角度 60° では 35 分～90 分後に最大IPFとなり、その後、製氷機内で閉塞、もしくはIPFが低下していき 115 分～125 分後に閉塞という結果となった。下段翼羽根角度 60° で上下段翼の円周方向の羽根位置を 45° ずらした組み合わせのみ、測定開始から 115 分後までIPFが上昇し、その後は 65 分間で 10wt%程度の低下で3時間製氷し続けることができた。羽根角度 90° では 35 分～65 分後に最大IPFとなり、そのほとんどが直後に製氷機内で閉塞、下段翼羽根角度 90° で上下段翼の円周方向の羽根位置を 45° ずらした組み合わせのみ、IPFが低下していき 70 分後に閉塞という結果となった。3 時間製氷し続けることができた組み合わせは3通りであった。そのすべてにおいて下段翼羽根角度が 60° であるという傾向が得られた。



(a)円周方向の羽根位置同じ

(b)円周方向の羽根位置 45° ズレ

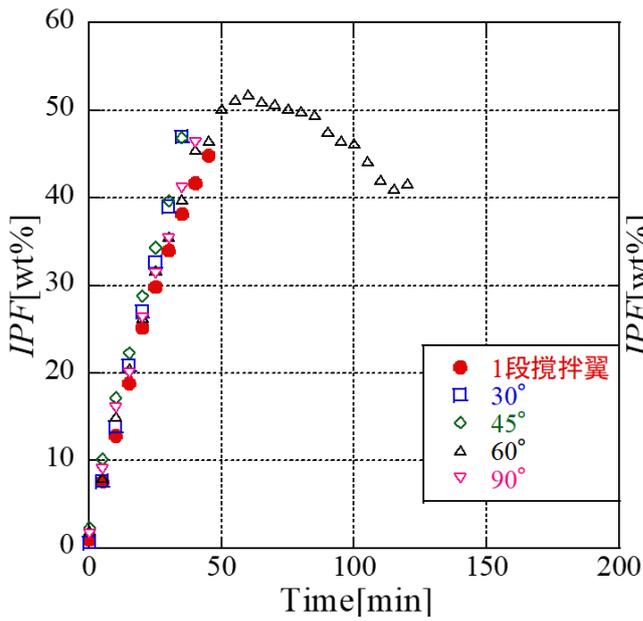
図 4-5 上段翼羽根角度 30° におけるIPF変化



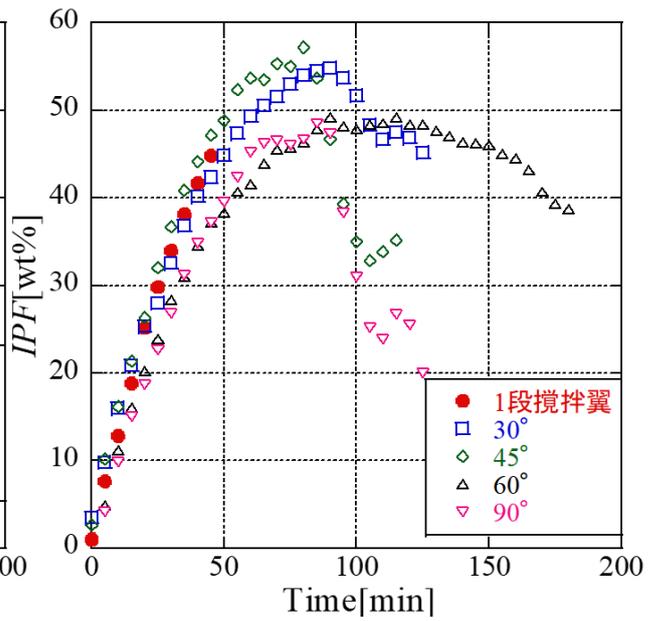
(a)円周方向の羽根位置同じ

(b)円周方向の羽根位置 45° ズレ

図 4-6 上段翼羽根角度 45° におけるIPF変化

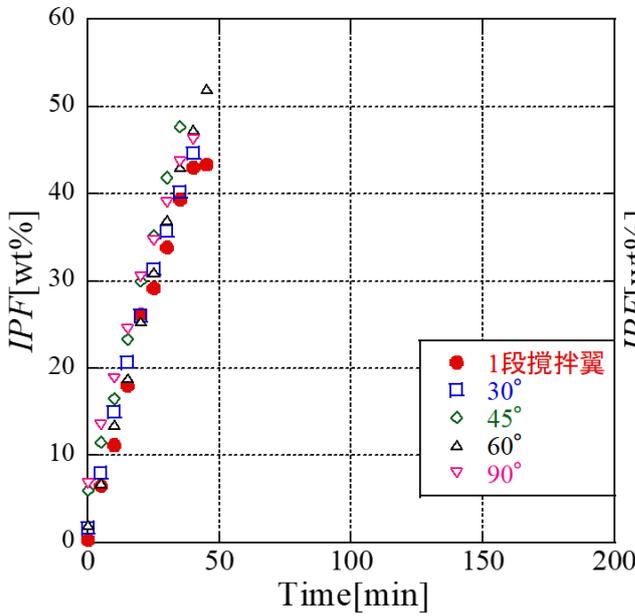


(a)円周方向の羽根位置同じ

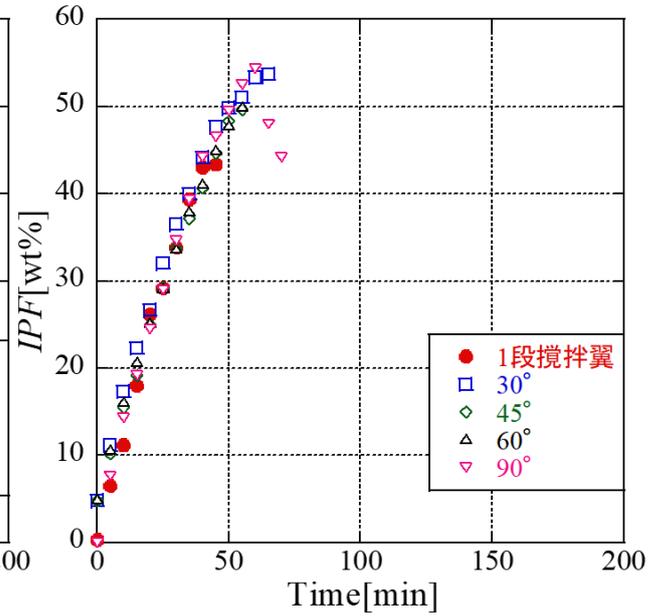


(b)円周方向の羽根位置 45° ズレ

図 4-7 上段翼羽根角度 60° におけるIPF変化



(a)円周方向の羽根位置同じ



(b)円周方向の羽根位置 45° ズレ

図 4-8 上段翼羽根角度 90° におけるIPF変化

表 4-1 各組み合わせにおける製氷機内の最大IPF

		最大IPF[wt%]				最大IPF[wt%]	
1段目	2段目	羽根位置 同じ	羽根位置 45°ズレ	1段目	2段目	羽根位置 同じ	羽根位置 45°ズレ
30°	30°	52.46	51.85	60°	30°	47.00	54.82
	45°	56.20	51.38		45°	46.81	57.14
	60°	54.34	53.70		60°	51.92	49.24
	90°	53.78	53.92		90°	46.33	48.54
45°	30°	49.66	57.87	90°	30°	44.75	53.63
	45°	51.30	53.20		45°	47.64	49.75
	60°	51.06	53.78		60°	52.00	50.00
	90°	50.90	54.41		90°	46.24	54.27

4.4 考察

1 段攪拌翼と 2 段翼攪拌翼でのIPFの経時変化を比較すると、同じ流入流量において 1 段攪拌翼では最大IPF到達直後すべての羽根角度で閉塞が発生した。これに対して 2 段攪拌翼では 32 通り中 17 通りで最大IPF到達後も製氷が行えた。これは、2 段攪拌翼に変更したことによる攪拌力の増大が考えられる。また、氷送り出し部内のシャフト部分への氷粒子密集の抑制が行えていたことも閉塞抑制の要因であると考えられる。攪拌されているスラリーアイスの氷粒子の挙動は氷粒子と水の密度差により、氷粒子がシャフト付近に密集する⁽⁷⁾。図 4-9 に示した攪拌翼を設置していない状態での氷送り出し部内の様子からもシャフト部分に氷粒子が密集していることが分かる。2 段攪拌翼を設置することで 1 段攪拌翼以上にシャフトへの氷粒子密集の抑制が行われていたと考えられる(図 4-10 参照)。3 時間製氷が行えた組み合わせは、上段翼 30°、下段翼 60° 及び上下段翼の円周方向の羽根位置が同じ組み合わせ、上段翼 45°、下段翼 60° 及び上下段翼の円周方向の羽根位置が同じ組み合わせ、上段翼 60°、下段翼 60° 及び上下段翼の円周方向の羽根位置 45°ズレの組み合わせである。このことから、2 段攪拌翼で長時間製氷を行うための最適な下段翼の羽根角度は 60° であると考えられる。また、上段翼 45°、下段翼 60°、上下段翼の円周方向の羽根位置が同じ組み合わせが本実験における最適な攪拌翼であると考えられる。この組み合わせは製氷開始 70 分以降からIPFの低下がみられ、本研究の目標としていたIPF=50wt%のスラリーアイスの安定生成は達成できなかった。しかし、IPF低下は 0.07wt%/min で他の組み合わせ

せと比較すると最も低いことが分かる(表 4-2 参照). したがって, 上記の組み合わせが安定生成に最適な攪拌翼であると考えられる.

次に製氷機内で閉塞が発生した原因について着目する. 閉塞までの *IPF* の経時変化として 2 パターン確認された. 1 つ目は *IPF* が上昇し閉塞していた. この原因は, スラリーアイスの流速が低下することで, 氷粒子が製氷機内で凝集し排出されなくなったことが考えられる. 2 つ目は最大 *IPF* まで製氷後, *IPF* が低下していき閉塞していた. この原因も氷粒子の凝集が原因と考えられる. 図 4-11 に凝集し塊状となった氷粒子(以下, 氷塊)を示す. 氷塊は時間とともに厚みを増し, 最終的に攪拌翼の存在していない範囲を覆った. 氷塊の形成は上段翼 30°, 45° では氷送り出し部上面から行われ, 上段翼 60°, 90° では氷送り出し部壁面から行われた.

最後に閉塞の 2 つ目のパターンに見られた *IPF* の低下に目を向ける. これは製氷機内で氷粒子の閉塞が発生しなかった組み合わせでも見られた. *IPF* 低下の原因が明らかになると本研究の目的である高 *IPF* スラリーアイスの安定生成が行える. *IPF* の低下原因として冷凍機の冷凍サイクルに着目する. 図 4-12 に本実験で用いた冷凍機の冷凍サイクルを示す. 冷凍サイクルはコンプレッサ, 凝縮器, 膨張弁, そして蒸発器で構成されており, 製氷機内の NaCl 水溶液を冷却している. 冷凍サイクルにおける蒸発器(以下, 製氷機)を挟んだ膨張弁とコンプレッサの過程に目を向ける. 膨張弁から製氷機内へ流入する冷媒の温度は感温筒によって制御されている. 感温筒は製氷機内へ流入する冷媒と流出する冷媒の温度差を基準に, コンプレッサ内へ液状の冷媒を流入させないために用いられる. 非圧縮性流体である液体がコンプレッサ内へ流入すると故障の原因になるため, 上記の仕組みとなっている. *IPF* の上昇に伴い製氷機内の氷粒子を生成する製氷部では, 製氷機内壁面と水溶液の熱交換の面積が氷粒子の存在により低下する. それにより感温筒が作動し, 膨張弁から製氷機内への冷媒の流入流量を減少させ, 液状の冷媒がすべて気体になるように制御する. これにより, 製氷量の減少から *IPF* が経時的に低下してしまう. そして, 製氷機内へ流入する冷媒と流出する冷媒の温度差が設定した数値以上になると, 冷媒の流入流量を増加させ *IPF* が経時的に上昇する. この現象は上段翼 30°, 下段翼 60°, 上下段翼の円周方向の羽根位置が同じ組み合わせのスラリーアイスの *IPF* 変化に見られた. したがって, *IPF* の低下は冷媒の温度差制御を液流量のみで行った機械的制御が原因と考えられ, *IPF*=50wt%のスラリーアイスの安定生成には冷凍サイクルの検討が必要となる.



図 4-9 氷送り出し部内の様子

表 4-2 各組み合わせにおける 1 分間の IPF 低下

		IPF低下[wt%/min]				IPF低下[wt%/min]	
1段目	2段目	羽根位置 同じ	羽根位置 45°ズレ	1段目	2段目	羽根位置 同じ	羽根位置 45°ズレ
30°	30°			60°	30°		0.27
	45°	0.34	0.85		45°		0.63
	60°	0.56	0.18		60°	0.17	0.12
	90°		0.23		90°		0.71
45°	30°		0.26	90°	30°		
	45°		0.29		45°		
	60°	0.07	0.29		60°		
	90°	0.28	0.08		90°		1.01

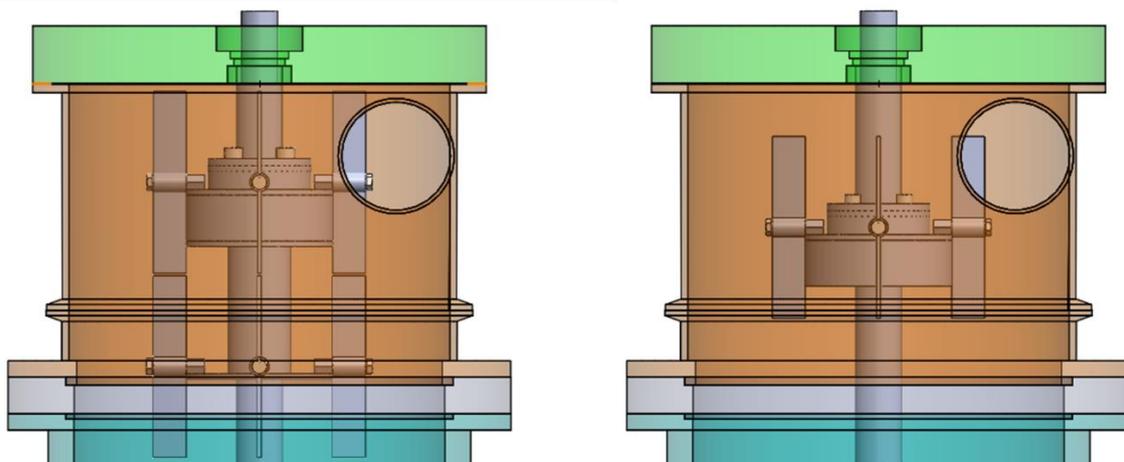


図 4-10 氷送り出し部内の攪拌翼設置状態

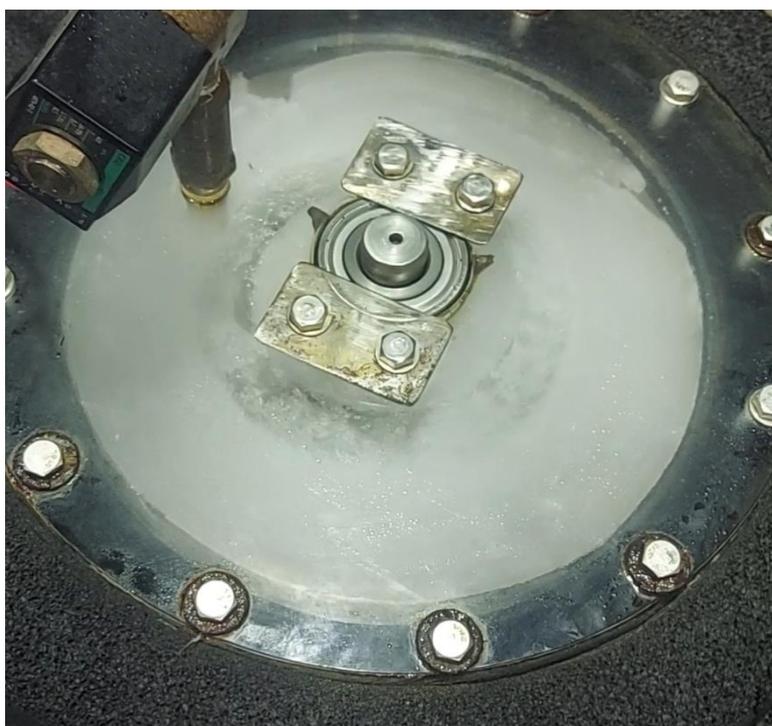


図 4-11 氷送り出し部に形成された氷塊

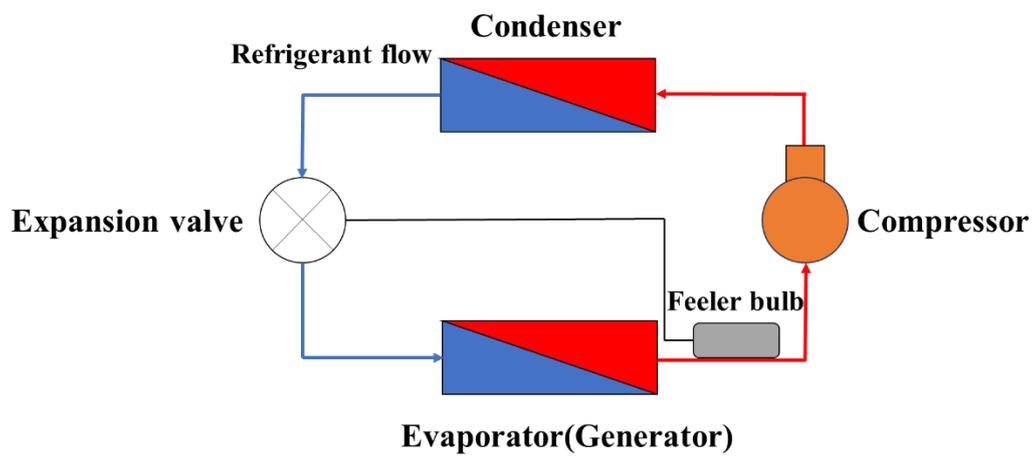


図 4-12 冷凍機の冷凍サイクル

第5章 結論

本研究では高 IPF スラリーアイスを実験的に生成し続ける装置の開発を目的とした。まず、既存の製氷機の現状を確認する実験を行った。その結果、目標 $IPF=50wt\%$ のスラリーアイスに到達すること無く製氷機内で閉塞が発生した。これより、製氷機氷送り出し部に攪拌機構を設置し攪拌力を増大することが必要であるという方向性を見出した。

そこで、製氷機氷送り出し部にパドル翼を設置し、製氷実験を行った。パドル翼の羽根角度を変化させることで目標 IPF のスラリーアイスを実験的に生成することができた。しかし、その後製氷機内で閉塞が発生した。さらなる攪拌力増大のために2段攪拌翼での製氷実験を行うこととした。

2段攪拌翼の羽根角度を変化させて製氷実験を行った。その結果、閉塞を発生させず設定時間まで製氷が行えた組み合わせが3通りである。しかし、目標 IPF 以上での安定した製氷は行えなかった。その原因として冷凍機の冷凍サイクルに着目し、機械的制御により IPF が低下したと考えられる。今後は $IPF=50wt\%$ の高 IPF スラリーアイスを実験的に生成するために、本研究で取り組んだ内部の攪拌翼に加えて冷凍サイクルの検討が必要である。また、本研究では攪拌力の増大による閉塞発生抑制を行ったが、製氷機氷送り出し部のスラリーアイス吐出口の径を変更するなどの設計構造の検討も必要である。

参考文献

- (1) 水産庁. “(2)漁業経営の動向”. を加工して作成
https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/r03_h/trend/1/t1_2_2.html. (参照 2023-12-5).
- (2) 日本冷凍空調学会. “氷スラリーによる冷蔵・冷却のための手引書”
2013-4-1~2016-3-31. pp.6-11.
- (3) 松本泰典. “スラリーアイスによる水産物の鮮度保持”.
日本海水学会誌, 第73巻, 第1号. 2019. p.15.
- (4) 高野礼. “導電率を利用した氷充填率のリアルタイム測定方法の研究” 2020-3-9. p.5.
- (5) 永田聡. “スラリーアイスのダイレクト生成構造に関する研究” 2019-3-11. p.23
- (6) 熊野寛之, 浅岡龍徳. アイススラリーの流動と熱伝達特性. 日本冷凍空調学会論文集
Trans. of the JSRAE Vol.33, No.4(2016), p.297
- (7) 末吉圭太. “スラリーアイスの攪拌における氷粒子挙動計算” 2022-3-3. p.25.

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご教授を頂きました高知工科大学システム工学群 松本泰典教授に深く感謝いたします。また、松本研究室の皆様、卒業された先輩方には無知な私に様々なことを丁寧に教えて頂いたことをここに厚く御礼申し上げます。