

2019（令和元）年度 修士学位論文

円管場におけるスラリーアイスの流れ場の解明

Elucidation of slurry ice flow field in a circular pipe

2020 年 3 月 9 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1225060 横山 皓平

指導教員 松本 泰典

目次

第1章 緒論.....	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 スラリーアイスの特徴.....	1
1.1.2 スラリーアイスの生成方法.....	3
1.2 研究目的	4
第2章 氷充填率の算出	6
第3章 角形タンクを使用した実験	7
3.1 実験目的	7
3.2 実験装置	7
3.3 タンク内IPFの算出.....	7
3.4 水を用いた実験.....	8
3.4.1 実験方法	8
3.4.2 実験結果および考察.....	8
3.5 スラリーアイスを用いた実験.....	10
3.5.1 実験方法	10
3.5.2 実験結果および考察.....	11
第4章 丸形タンクを使用した実験	16
4.1 実験目的	16
4.2 水を用いた実験.....	16
4.2.1 実験方法	16
4.2.2 実験結果および考察.....	17
4.3 スラリーアイスを用いた実験.....	18
4.3.1 実験方法	18
4.3.2 実験結果	19
4.4 考察	22
第5章 結言	24

参考文献

謝辞

第1章 緒論

1.1 研究背景

1.1.1 スラリーアイスの特徴

生鮮魚介類の鮮度保持に用いられる主なスラリーアイスは、粒子径が 0.2mm 程度の微少な氷粒子と NaCl 水溶液が混在した流動性を有する冷却媒体である。Table 1-1 に示すように魚介類の凍結温度は、 -2.0°C ～ -1.0°C の範囲に多く分布している。これに対して Table 1-2 に示すように、1.0wt%～2.0wt%の NaCl 水溶液からスラリーアイスを生成すると、凝固点降下によりスラリーアイスの温度を、 -0.6°C ～ -1.8°C の間で調整することができる。1wt%の NaCl 水溶液から氷充填率(以下、Ice Packing Factor : IPF)が 20～30wt%のスラリーアイスを生成すると、スラリーアイスの温度を -0.8 ～ -0.9°C とすることができ、魚介類の凍結温度に近い温度での保存が可能となる。 IPF とは、スラリーアイス内に占める氷の割合であり、水溶液の質量を $m_l[\text{kg}]$ 、氷の質量を $m_i[\text{kg}]$ とすると次式で表される。

$$IPF = \left(\frac{m_i}{m_l + m_i} \right) 10^2 \quad (1.1)$$

Fig.1-3 にデジタルマイクロスコープ(キーエンス製, VHX-500)で撮影した 1wt%の NaCl 水溶液から生成したスラリーアイスを示す。氷粒子を球形と考えると、単位体積あたりの比表面積 S_v は直径を D とすると、 $S_v = 6/D$ で表される。粒子径の小さいスラリーアイスは同体積の砕氷と比べ、冷却対象物との接触面積が大きくなるため、熱交換が多くなり、融解しやすくなる。従って、砕氷と比較し、冷却対象物を急速に冷却することができる。また、スラリーアイスは $IPF \leq 30\text{wt}\%$ では、攪拌操作を行うことで流動状態となり、ポンプを用いて移送することができるという利点もある¹⁾。

Table 1-1 魚介類の凍結温度

魚種	凍結温度($^{\circ}\text{C}$)	魚種	凍結温度($^{\circ}\text{C}$)
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

Table 1-2 NaCl 水溶液の初期塩分濃度，氷充填率とスラリーアイスの温度の関係

初期塩分濃度 (wt%)	氷充填率(wt%) (IPF : Ice Packing Factor)					
	0	10	20	30	40	50
3.5(海水)	−2.2	−2.5	−2.8	−3.2	−3.7	−4.5
3.1	−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

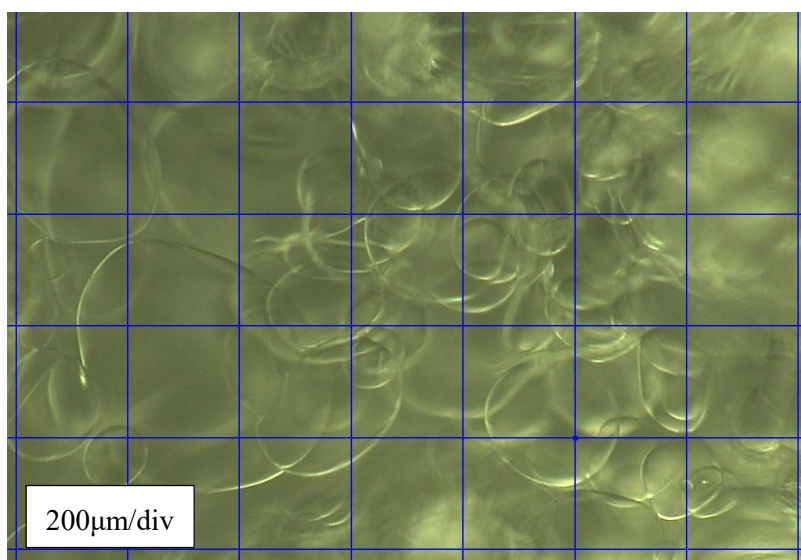


Fig.1-3 スラリーアイスの拡大写真

1.1.2 スラリーアイスの生成方法

既存のスラリーアイス製造装置は、塩分濃度 1wt%の NaCl 水溶液（以下、NaCl 水溶液）を貯蔵タンクと製氷機間で循環させることによって貯蔵タンク内に氷粒子を生成し、増加させていく方式である。製氷機はジェネレーター、モーター、ポンプ、冷凍機で構成されている。Fig.1-5 にフローを示す。ジェネレーター内部は二重円筒構造になっており、円筒内部に掻き取り刃があり、モーターの駆動力で回転する。二重円筒間に冷媒を循環させ、ポンプにより NaCl 水溶液を流入させる。時間が経過すると、円筒壁面に氷膜が形成される。その氷膜を掻き取り刃により連続的に掻き取ることで溶液中に氷粒子を浮遊させ、スラリーアイス进行生成する。

既存の装置で、100L の NaCl 水溶液をタンク内に貯め、スラリーアイス进行生成した際の IPF の経時变化を Fig.1-7 に示す²⁾。この結果より、スラリーアイス生成時から $IPF \geq 25\text{wt}\%$ となるまでに 2 時間以上の時間を要することが分かる。そのため、スラリーアイス进行使用する数時間前から装置を稼動させる必要がある。また、漁港等で生鮮魚介類に対して使用する場合を考えると、スラリーアイス进行の必要量はその日の天候や漁獲量によって变化する。しかし、既存の循環方式の生成方法では、タンク内に貯蔵した量のスラリーアイスしか生成できないため、最大使用量を想定し生成しておく必要がある。これにより、既存の循環方式の生成方法では必要な量のみのスラリーアイス进行の生成を行えない。また、タンク内に貯蔵されたスラリーアイスは、氷粒子と水溶液の密度差により氷粒子が上部に浮遊し、氷粒子同士が凝集してしまいスラリーアイスとしての性状を保つことができないため、常に攪拌操作を行い、流動性を保つ必要がある。

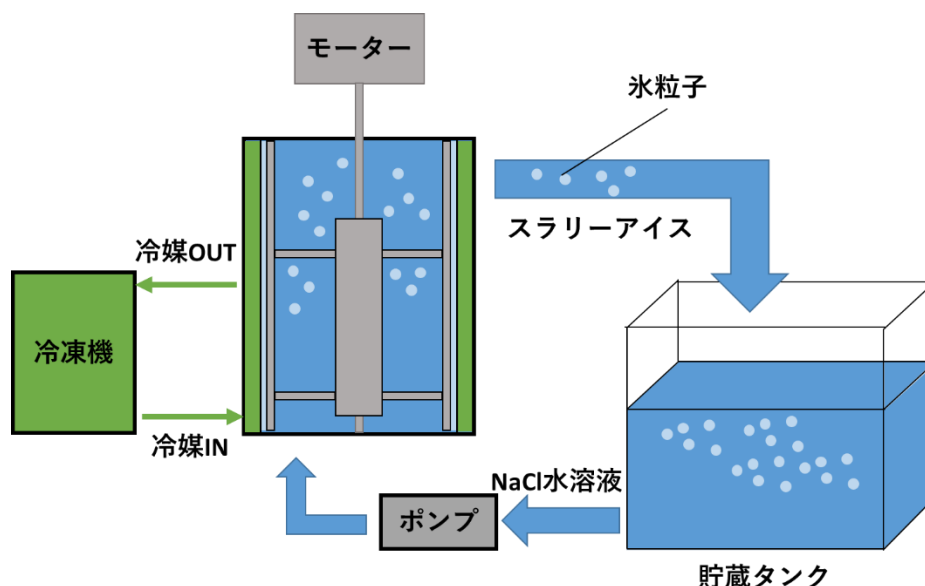


Fig.1-5 循環方式フロー

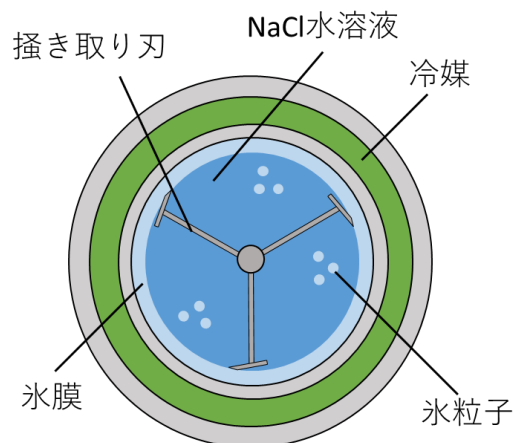


Fig.1-6 上部から見たジェネレーターの内部

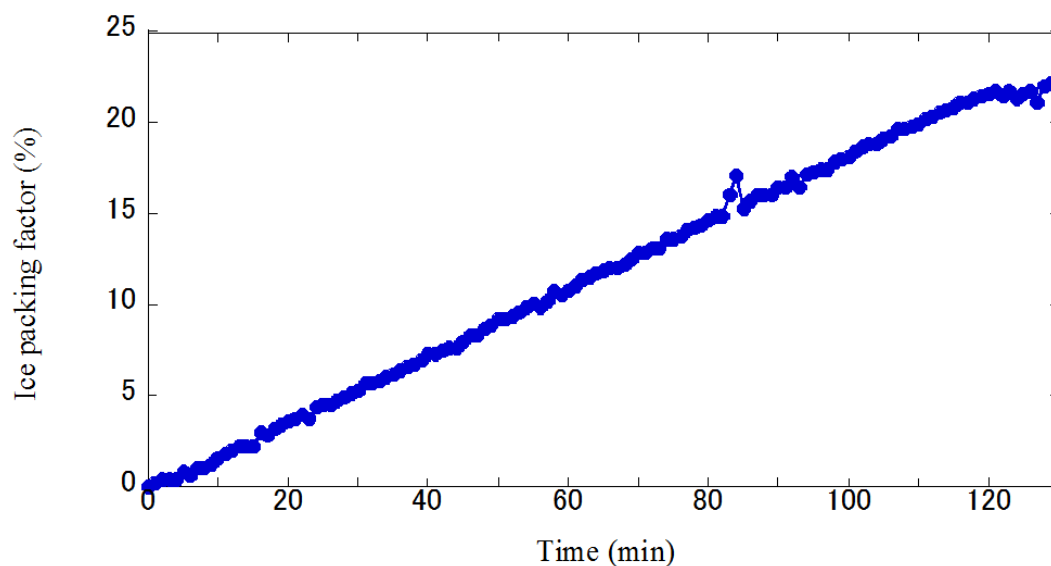


Fig.1-7 循環方式により生成されるスラリーアイスのIPF経時変化

1.2 研究目的

本研究室では、既存の装置の課題を解決するためにダイレクト型スラリーアイス製造装置の研究開発に取り組んでいる。この装置は、既存の装置から貯蔵用タンクを除し、NaCl水溶液がジェネレーターを通過すると、 $IPF \geq 25\text{wt}\%$ のスラリーアイスが生成されるようなダイレクト方式である。Fig.1-7 にダイレクト方式の装置フローを示す。スラリーアイスは使用する水溶液、 IPF 、氷粒子径など様々な要素があり、物理的性質については十分に明らかとなっていない点が多い。そのため、本研究室ではジェネレーター内部の流体解析を行う際にニュートン流体である水を用いて解析を行っているのが現状である。そこで本研究では、重要な物性値である粘度について着目した。

スラリーアイスは非ニュートン流体としての扱いが提案されているが、 IPF の変化によっ

てビンガム流体や擬塑性流体などと言われている。また、スラリーアイスの生成方法や使用する水溶液の種類、濃度によって物理的性質は異なる。スラリーアイスの粘度を計測し、流動特性を把握することで、流体解析によりシミュレーションも行うことができ、スラリーアイス製造装置の最適な設計や、ポンプの選定を行えるようになるため、解明が求められている。

粘度の計測方法には、回転式や振動式などの方法があるが、スラリーアイスの粘度計測において、密度差による氷粒子の浮遊や、氷粒子同士の凝集によりサンプル容器内が一様な状態とならないといったこと、また氷粒子の融解といった課題がある。

また、スラリーアイスには、ポンプにてパイプライン輸送が行えるという特徴があるが、輸送パイプ中での閉塞や、*IPF*の低下といった課題がある。そこで本研究では、円管場におけるスラリーアイスの流れから、流動特性を解明することを目的とした。

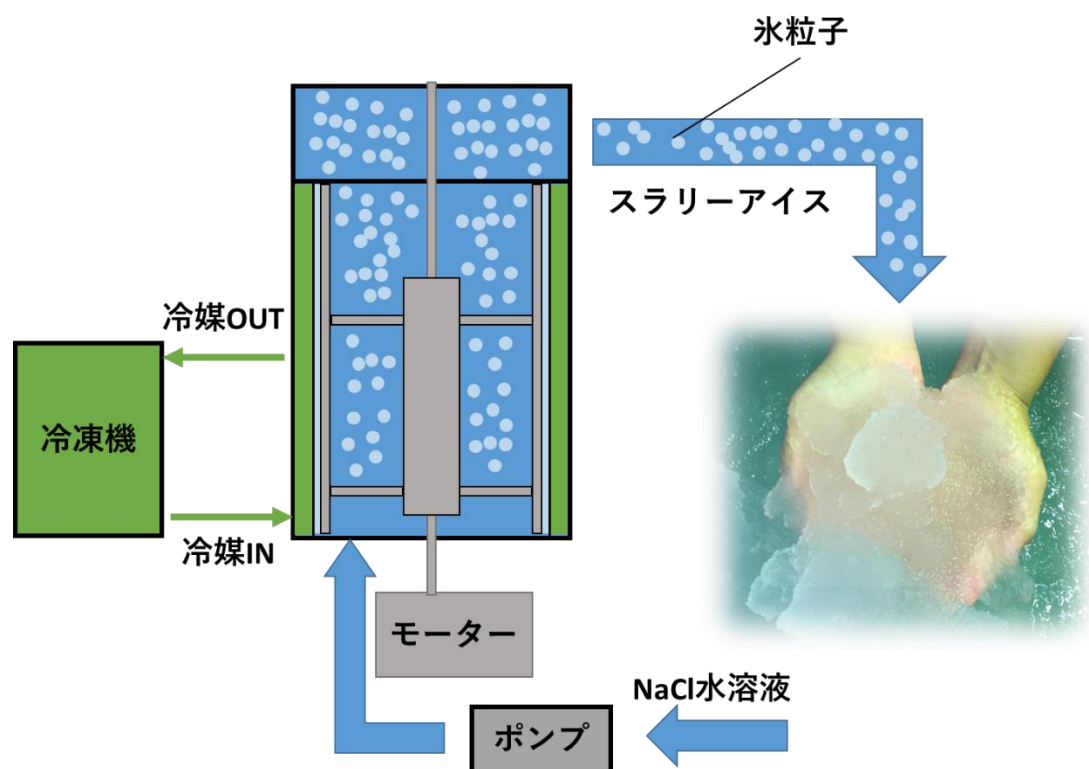


Fig.1-7 ダイレクト方式フロー

第2章 氷充填率の算出方法

*IPF*とは、スラリーアイス全体に占める氷粒子の割合であり、式(1.2)より算出することが出来るが、NaCl 水溶液の塩分濃度より算出する方法について示す。

生成前の NaCl 水溶液中の水の質量を A_0 [kg]、NaCl の質量を a [kg]とし、初期塩分濃度 a_0 [wt%]は

$$a_0 = \frac{100a}{A_0 + a} \quad (2.1)$$

と表される。 A_0 について展開すると

$$A_0 = \frac{100a}{a_0} - a \quad (2.2)$$

となる。氷粒子は純水であるため、氷粒子生成後の NaCl 水溶液中の水の質量を A_1 [kg]、NaCl の質量を a [kg]、塩分濃度を a_1 [wt%]とすると

$$a_1 = \frac{100a}{A_1 + a} \quad (2.3)$$

となる。 A_1 について展開すると

$$A_1 = \frac{100a}{a_1} - a \quad (2.4)$$

となる。スラリーアイス中の氷粒子の質量を x [kg]とすると、氷の質量は

$$x = A_0 - A_1 \quad (2.5)$$

となる。*IPF*はスラリーアイスの氷粒子の質量割合なので

$$IPF = \frac{100x}{A_1 + a + x} \quad (2.6)$$

式(2.5)と(2.6)より

$$IPF = \frac{100x}{A_0 + a} \quad (2.7)$$

式(2.2)、(2.4)、(2.5)より氷粒子の質量は

$$x = \frac{100a}{a_0} \left(1 - \frac{a_0}{a_1}\right) \quad (2.8)$$

となる。式(2.7)と(2.8)より

$$IPF = 100 \left(1 - \frac{a_0}{a_1}\right) \quad (2.9)$$

となり、初期塩分濃度とスラリーアイス生成後の塩分濃度の比より*IPF*を算出することができる。

第3章 角型タンクを使用した実験

3.1 実験目的

スラリーアイスは直接粘度を計測し、流動特性を明らかにすることが困難である。そこで円管内を流れるスラリーアイスの圧力損失を計測し、スラリーアイスの流れ場、流動特性について検討することを目的とした。

3.2 実験装置

実験装置の概略を Fig.3-1 に示す。実験装置は、貯蔵用角型タンク(伸和製, ブル・コンテナジャンボ角 180), 内径 32mm のアクリルパイプ, ボールバルブ(旭有機材製, V2ALVUEF1032), 差圧計(長野計器製, GC50), 流量計(キーエンス製, FD-M50AT), 氷粒子融解用タンク(ダイライト製, Y-100L), ポンプ(三相電機製, PMD-1521B6M)からなる。アクリルパイプには 0.5m の間隔を空け, 鉛直下向きにビニールチューブにより差圧計と接続した。

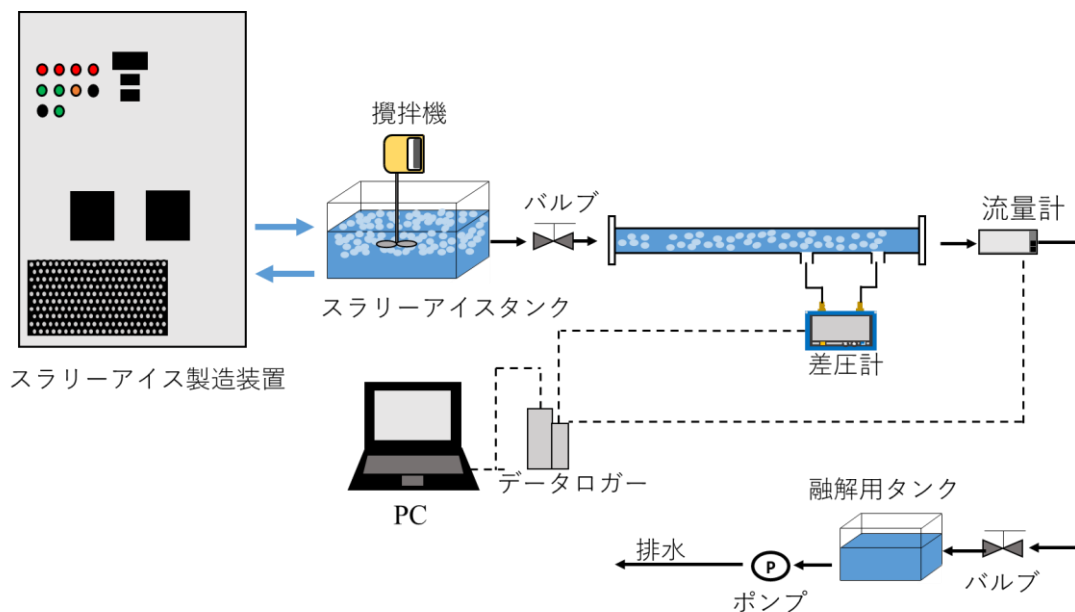


Fig.3-1 実験装置の概略

3.3 タンク内IPFの算出

IPFの算出は塩分濃度を計測することで式(2.9)より算出することができるが、循環方式のスラリーアイス製造装置の場合、ジェネレーターとタンク間を循環している水溶液の質量を考慮する必要がある。タンク内の NaCl 水溶液の質量を $A[\text{kg}]$ 、ジェネレーター内部を循環している水溶液の質量を $B[\text{kg}]$ と置くと、タンク内の氷の質量 $x[\text{kg}]$ は

$$x = (A + B) \times \frac{IPF}{100} \quad (3.1)$$

と表すことができる．従って，タンク内の IPF を $IPF_t[\text{wt}\%]$ と置くと

$$IPF_t = \frac{(A + B) \times \frac{IPF}{100}}{A} \times 100 \quad (3.2)$$

となる．式(3.2)に式(2.9)を代入すると

$$IPF_t = \frac{(A + B) \left(1 - \frac{a_0}{a_1}\right)}{A} \times 100 \quad (3.3)$$

となり，塩分濃度からタンク内の IPF を算出することができる．

3.4 水を用いた実験

3.4.1 実験方法

まず，本実験装置の有効性を確認するために物性値が既知の水を用いて実験を行った．タンク内に 160L の水を貯め，その後，下流側のバルブを開放し，自然流下によりアクリルパイプ内に送液し，差圧計により 5~20L/min の流量範囲の圧力損失を計測した．本実験では，スラリーアイスを用いて実験を行う際に，ポンプからの熱による氷粒子の融解を防ぐために，ポンプを用いない送液方法として自然流下による送液を行った．圧力損失と流量のデータ収集にはデータロガー(キーエンス製，NR-500，NR-TH08)を用いた．データのサンプリング周期は 0.1s とし，実験は 3 回行った．

3.4.2 実験結果および考察

計測した流量と単位距離当たりの圧力損失 $\Delta P/l[\text{Pa/m}]$ の関係を Fig.3-2 に示す．3 回で同様の傾向を示し，流量の減少に伴い，圧力損失も減少するという結果が得られた．

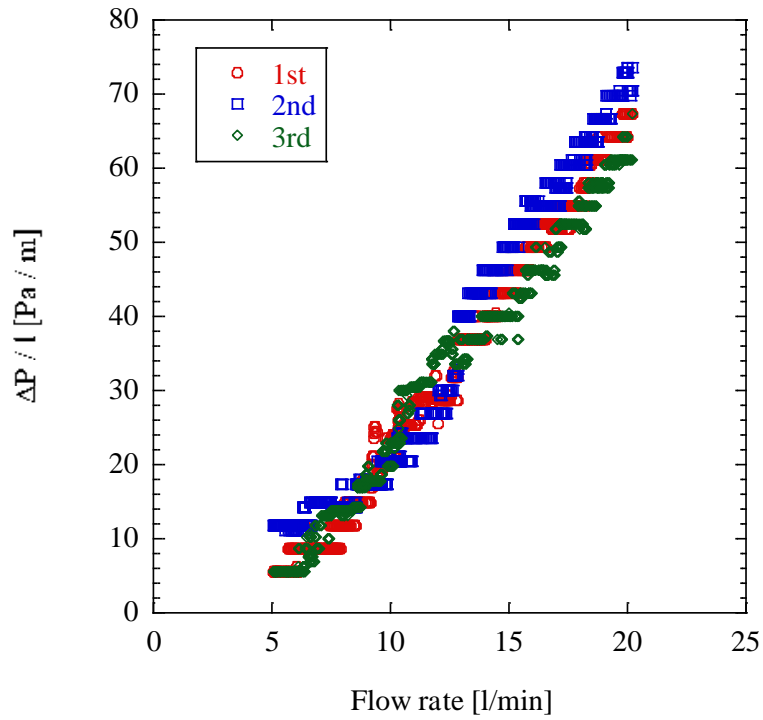


Fig.3-2 流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

また、計測値の平均と理論値を比較した結果を Fig.3-3 に示す。理論値は式(3.4)のダルシー・ワイズバッハの式³⁾より算出した。管摩擦係数は、層流域では式(3.5)、乱流域では式(3.6)より計算した。

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (3.4)$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.5)$$

$$\lambda = 0.316 Re^{-\frac{1}{4}} \quad (3.6)$$

Δp : 圧力損失[Pa], λ : 管摩擦係数[-], d : 管内径[m], l : 測定区間[m],
 ρ : 密度[kg/m³], w : 流速[m/s], Re : レイノルズ数[-]

計測値と理論値を比較すると、誤差はあるものの理論値と同様の結果となっている。このことから、本装置による圧力損失の計測が有効であると考え、スラリーアイスの圧力損失についても同様に計測が行えると考ええる。

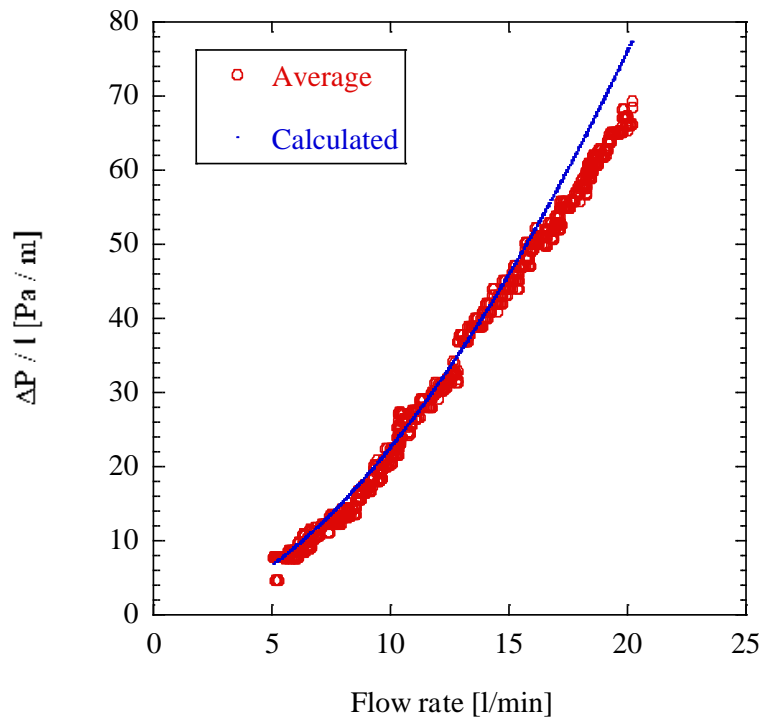


Fig.3-3 計測値の平均値と理論値との比較

3.5 スラリーアイスを用いた実験

3.5.1 実験方法

タンク内に 1wt%の NaCl 水溶液を 160L 作成し、循環方式のスラリーアイス製造装置によりスラリーアイスを生じた。生成後、下流側のバルブを開放し、スラリーアスをアクリルパイプに送液し、差圧計により圧力損失を計測した。このとき、静止状態では氷粒子が上部に浮遊し、凝集してしまう。そのため、一様な状態でアクリルパイプ内に送液するために攪拌機(マキタ製, UT1305)により攪拌を行いながら実験を行った。アクリルパイプ内へ送液した。流量範囲は水の時と同様に 5~20L/min で圧力損失を計測した。スラリーアスはポンプにより排水を行ったが、ポンプで閉塞してしまう恐れがあるため、氷粒子融解用タンクを設け、水を用いて氷粒子を融解させながら排水を行った。IPFは 5~25wt%の 5wt%刻みで計測を行った。データのサンプリング周期は 0.1s とし、各実験は各IPFにつき 3 回行った。IPFは Fig.3-4 のように固液分離を行い、スラリーアスの液体部を試験管に充填し、塩分濃度を塩分濃度計(アタゴ製, PAL-SALT)により計測し、式(3.3)より算出した。なお、フィルターは日本製紙クレシア製のキムワイプ S-200 を使用した。

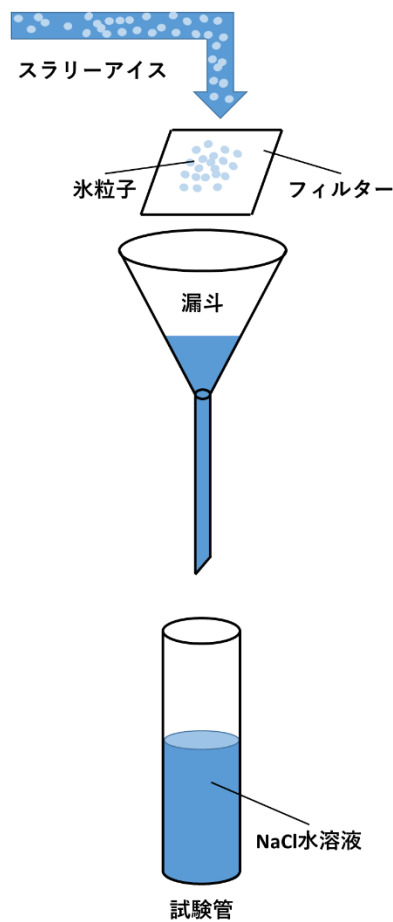


Fig.3-4 スラリーアイスの固液分離

3.5.2 実験結果および考察

各実験の計測結果を Fig.3-5~Fig.3-10 に示す. 各 IPF において再現性を確認することができた. また, $IPF = 15\text{wt}\%$ までは, IPF の上昇に伴い圧力損失が増加するという結果が得られた. しかし, スラリーアイスの計測においては計測値が安定しない結果となった. 特に, $IPF \geq 20\text{wt}\%$ では計測値が大きく乱れる結果となった. また流量計部にて氷粒子が閉塞してしまい, 計測を行うことができなかった.

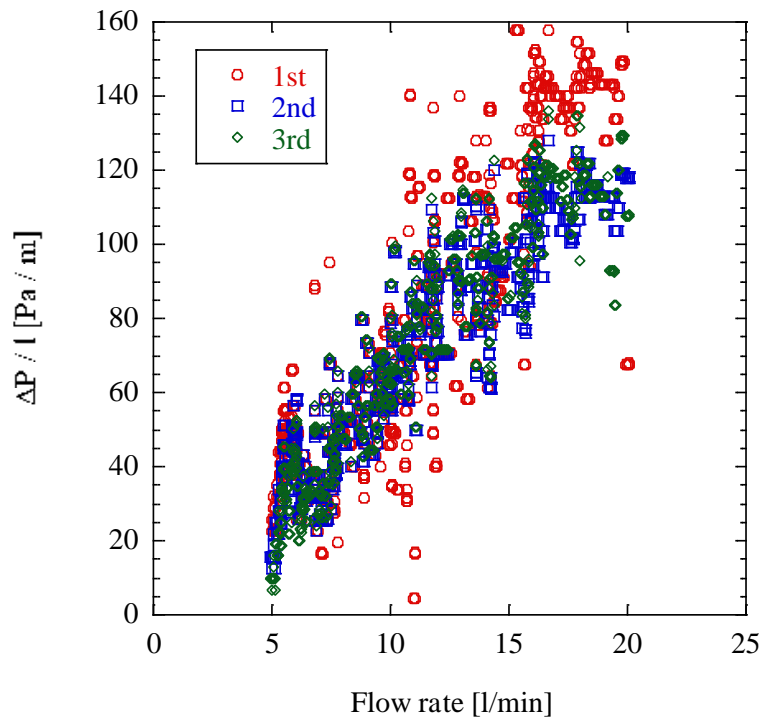


Fig.3-5 $IPF = 5\text{wt}\%$ における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

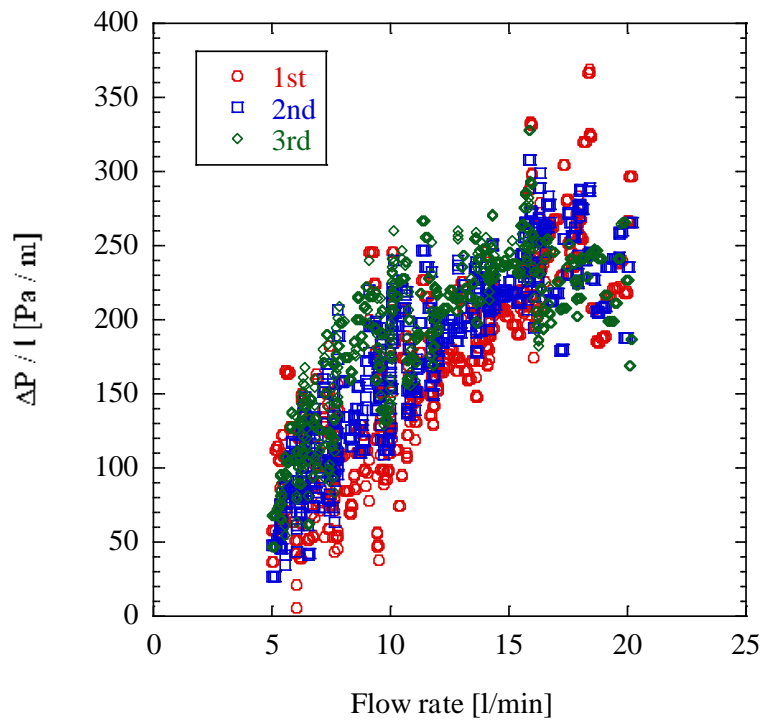


Fig.3-6 $IPF = 10\text{wt}\%$ における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

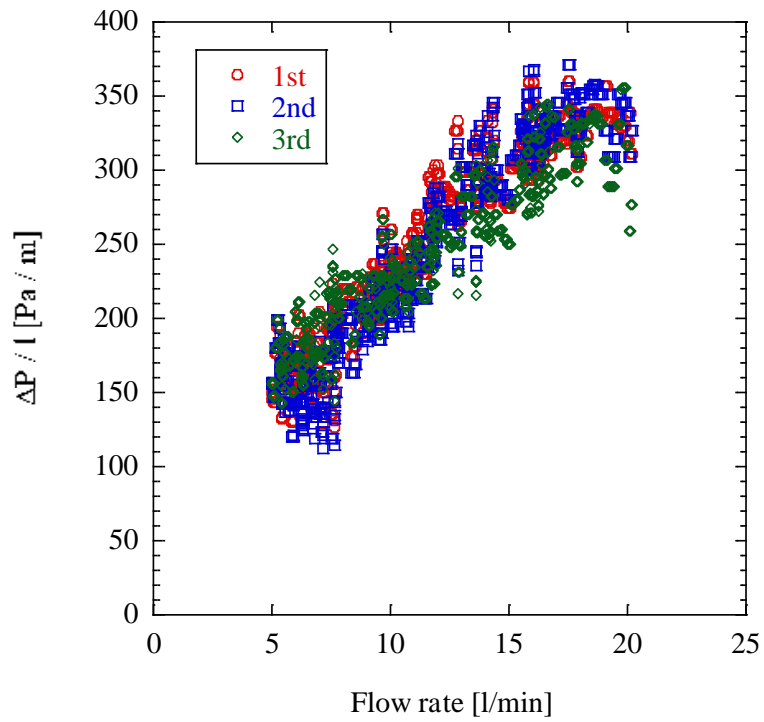


Fig.3-7 IPF = 15wt%における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

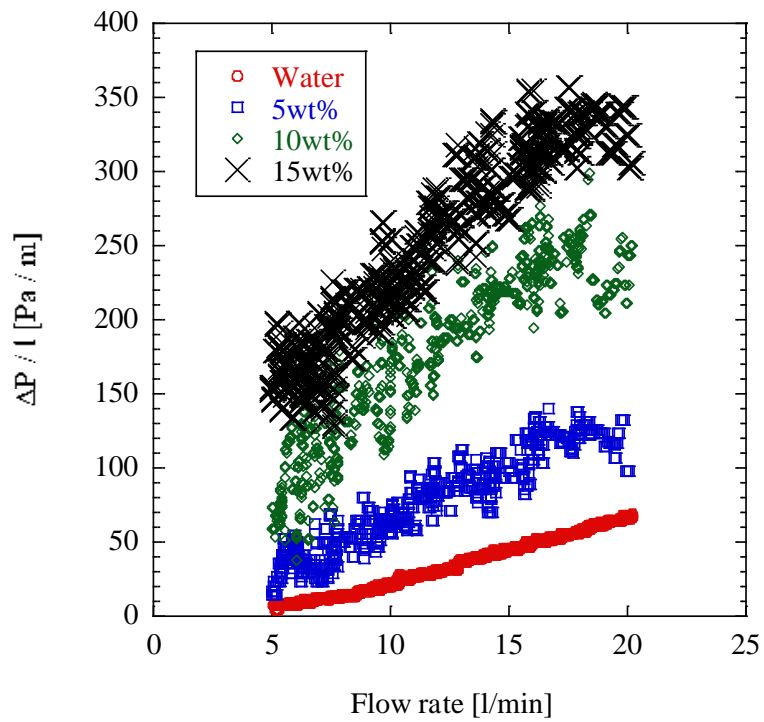


Fig.3-8 水をよびIPF=0~15wt%の平均値

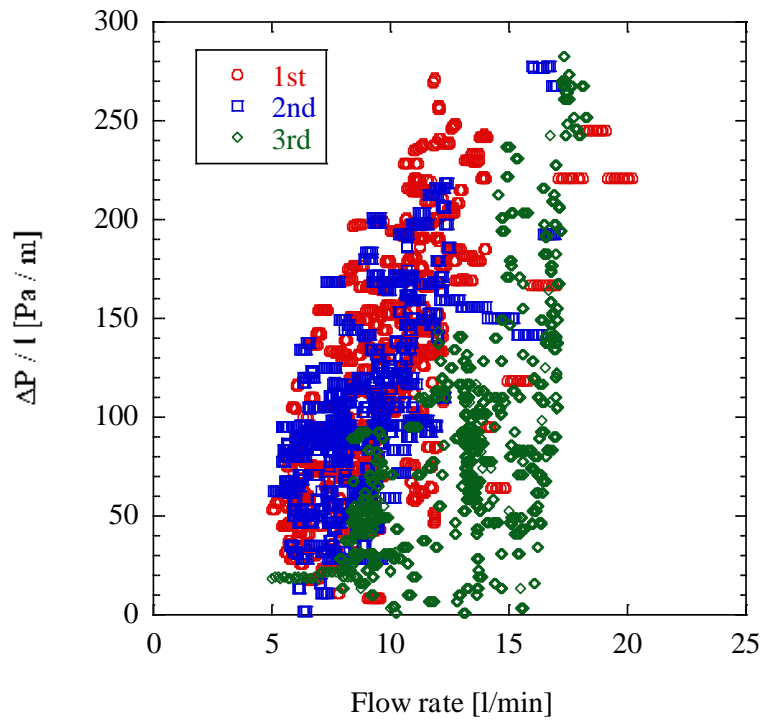


Fig.3-9 IPF = 20wt%における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

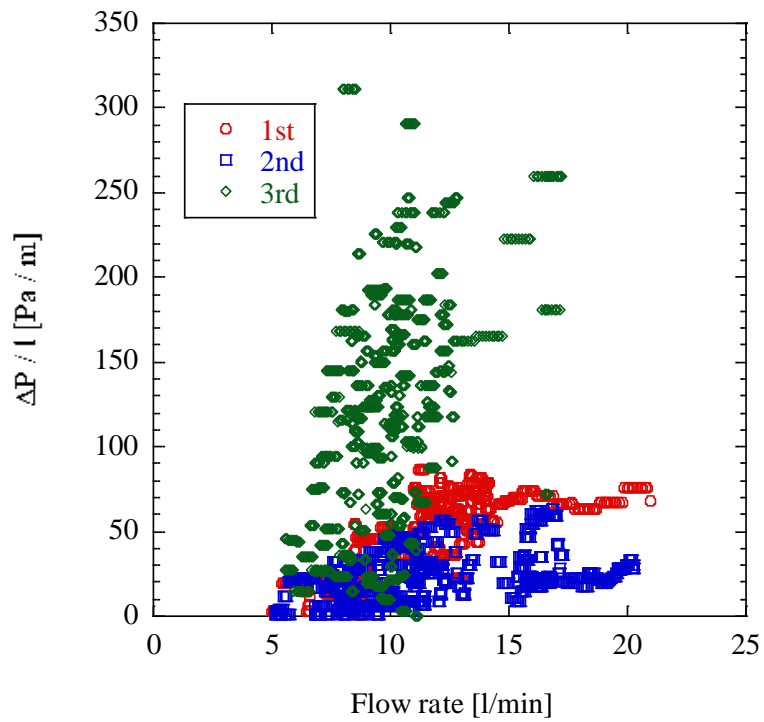


Fig.3-10 IPF = 25wt%における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

IPFが上昇するに伴い、圧力損失の値も上昇した。これは氷粒子が増加したことにより、管壁との摩擦が大きくなり上昇したと考えられる。

また、スラリーアイスの圧力損失の計測においては計測値の乱れと閉塞により、正しく計測が行えなかったが、これは攪拌が一様に行えていなかったことが原因であると考えられる。Fig.3-11 に実験中のアクリルパイプの画像を示す。スラリーアイス中の氷粒子にばらつきがあり、さらに攪拌による気泡が混在しており計測に影響が出たと考えられる。また、スラリーアイス貯蔵タンクの寸法が $990 \times 650 \times 295\text{mm}(W \times D \times H)$ に対して、攪拌翼直径が 165mm であり、十分に攪拌が行えていなかったと考えられる。したがってスラリーアイスの圧力損失の計測を行うためには、十分に攪拌が行えるタンク形状、攪拌機を用いる必要がある。

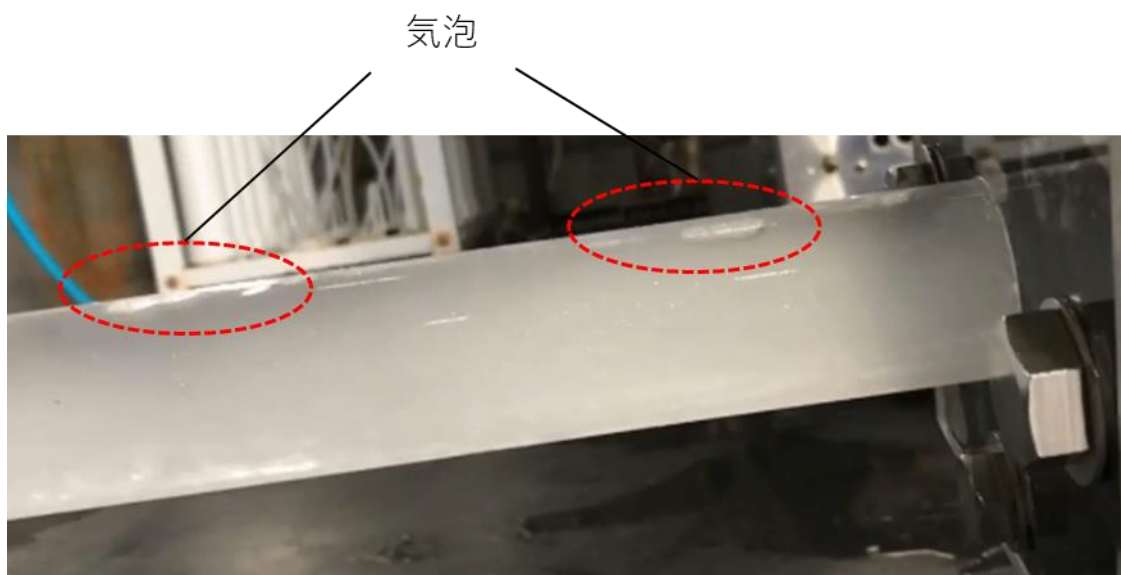


Fig.3-11 気泡の混在

第4章 丸型タンクを使用した実験

4.1 実験目的

角形タンクを使用した実験では、スラリーアイス十分に攪拌することができず、氷粒子の凝集やアクリルパイプ中での氷粒子のばらつきにより計測値が乱れ、安定して計測することができなかった。第3章と同様にスラリーアイスの圧力損失から、スラリーアイスの流れ場、流動特性について検討することを目的とした。本実験では、十分に攪拌を行えるよう第3章で使用した角形タンクよりも底面積の小さな丸型タンクを貯蔵用タンクとして使用し、実験を行った。

4.2 水を用いた実験

実験装置の概略を Fig.4.1 に示す。第3章で使用した実験装置から貯槽タンクを丸型タンク(カイスイマレン製, MH-140)に変更し、流出口をタンク底部に変更した。タンク周囲には侵入熱を防ぐため断熱シート(日商エアロ製, エアロフレックスシート)を貼り付けた。タンクと流出口を変更したため、第3章と同様に実験装置の有効性を確認するために水を用いて実験を行った。

4.2.1 実験方法

タンク内に 140L の水を貯める。その後、第3章と同様の方法で 5~20L/min の流量範囲の圧力損失を差圧計とデータロガーを用いて計測、収集した。データのサンプリング周期は 0.1s とし、実験は3回行った。

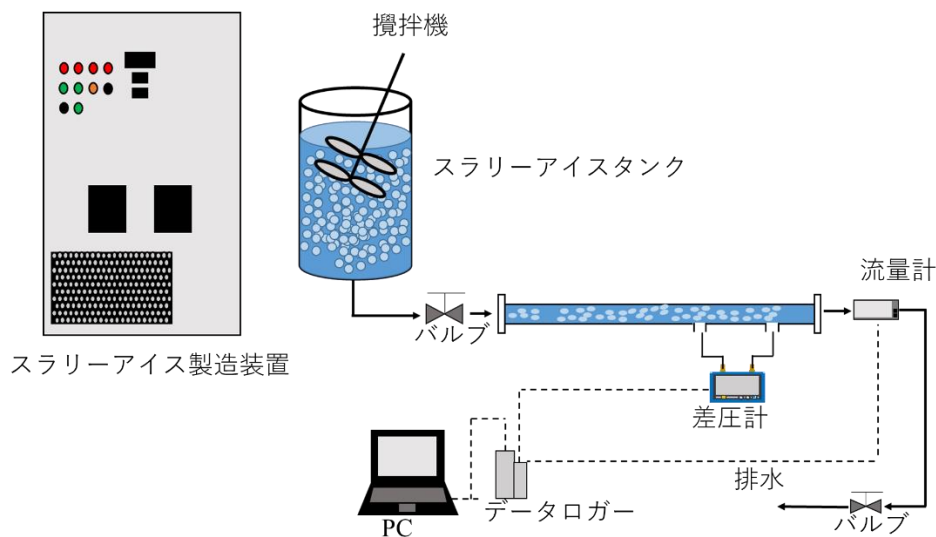


Fig.4.1 実験装置の概略

4.2.2 実験結果および考察

計測した流量と単位距離当たりの圧力損失 $\Delta P/l$ [Pa/m]の関係を Fig.4-2 に示す．本実験装置でも再現性を確認することができ，第 3 章と同様に流量の減少に伴い圧力損失も減少するという結果が得られた．また，式(3.4)より算出した圧力損失の理論値と計測値の平均値を比較した結果を Fig.4-3 に示す．誤差はあるものの本実験装置でも理論値と同様の圧力損失を計測することができた．したがって，本装置による圧力損失の計測が有効であると考え，スラリーアイスの圧力損失についても同様に計測が可能であると考ええる．

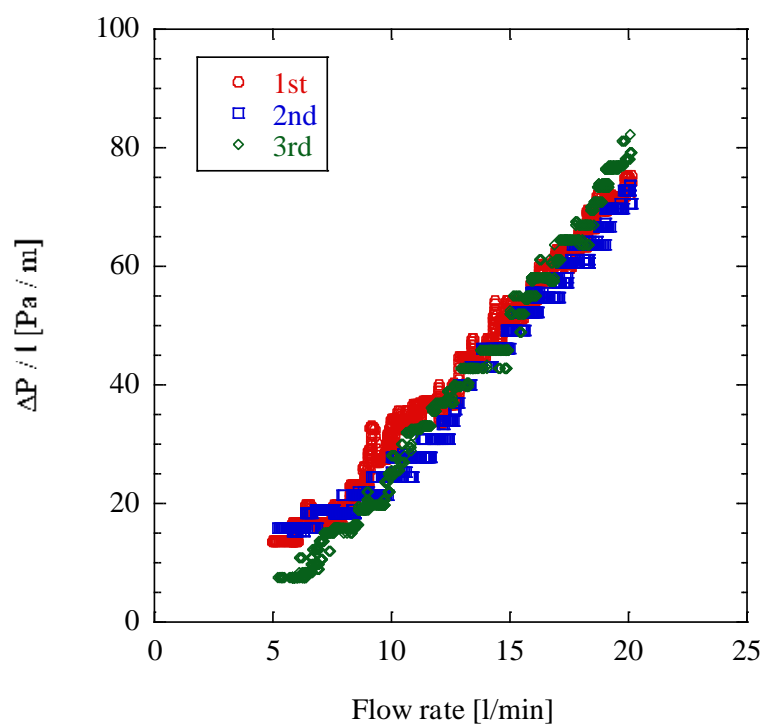


Fig.4-2 流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

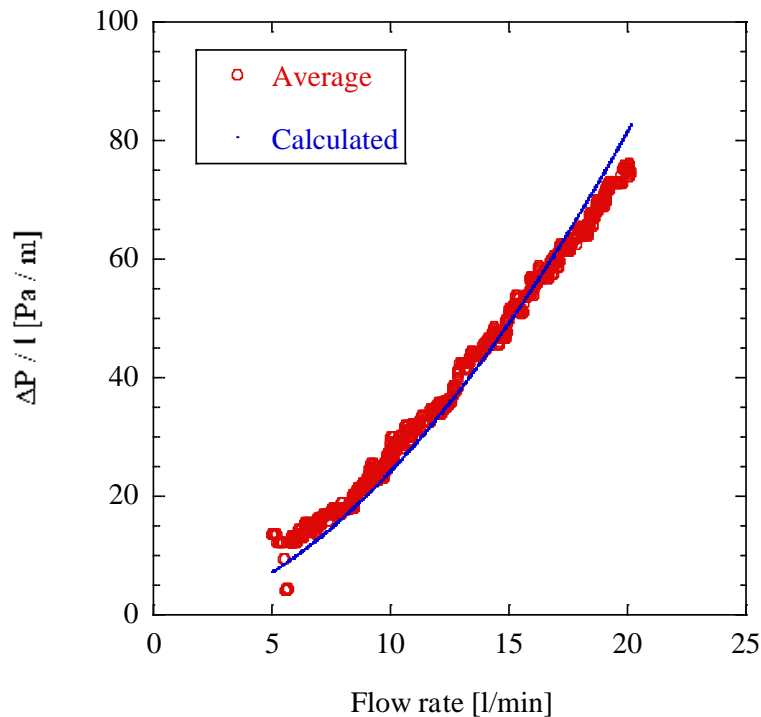


Fig.4-3 計測値の平均値と理論値との比較

4.3 スラリーアイスを用いた実験

4.3.1 実験方法

タンク内に 1wt%の NaCl 水溶液を 140L 作成し、循環方式のスラリーアイス製造装置によりスラリーアイスを生じた。氷粒子の凝集を防ぐため、生成時には攪拌機(阪和化工機製, KP-4001A)により 300min^{-1} で攪拌を行った。回転数は回転計(小野測器製, HT-5500)を用いて計測した。生成後、下流側のバルブを開放し、攪拌を行いながらスラリーアスをアクリルパイプに送液した。流量範囲は水の時と同様に 5~20L/min で、差圧計により圧力損失を計測した。このとき、攪拌により渦が発生し、気泡が発生してしまうためフロートとしてポリプロピレン製容器(アズワン製, アイボーイ)を用いた。IPFは 5~25wt%の 5wt%刻みで計測を行った。データのサンプリング周期は 0.1s とし、各実験は各 3 回行った。IPFは固液分離を行った後、塩分濃度計(アタゴ製, PAL-SALT)により液体部の塩分濃度を計測し、式(3.3)より算出した。

4.3.2 実験結果

計測した各実験の流量と単位距離当たりの圧力損失 $\Delta P/l$ [Pa/m]の関係を Fig.4-4~Fig.4-8 に示す。各IPFにおいて再現性を確認することができ、第 3 章での実験結果と比較し、安定して計測することができた。すべてのIPFにおいて、IPFの上昇に伴い、圧力損失も上

昇するという結果が得られた。また、各計測値の平均値の 5 秒平均を Fig.4-9 に示す。
 $IPF = 10\text{wt}\%$ では、流量の上昇に伴い、圧力損失も上昇しているが、流量が 15L/min 以上では圧力損失の上昇傾向がゆるやかになるという結果が得られた。

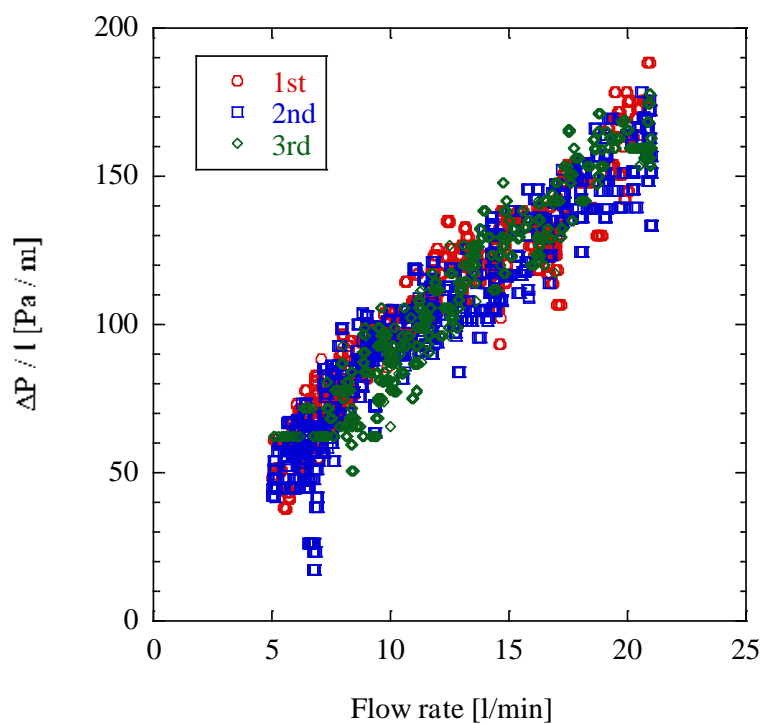


Fig.4-4 $IPF = 5\text{wt}\%$ における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

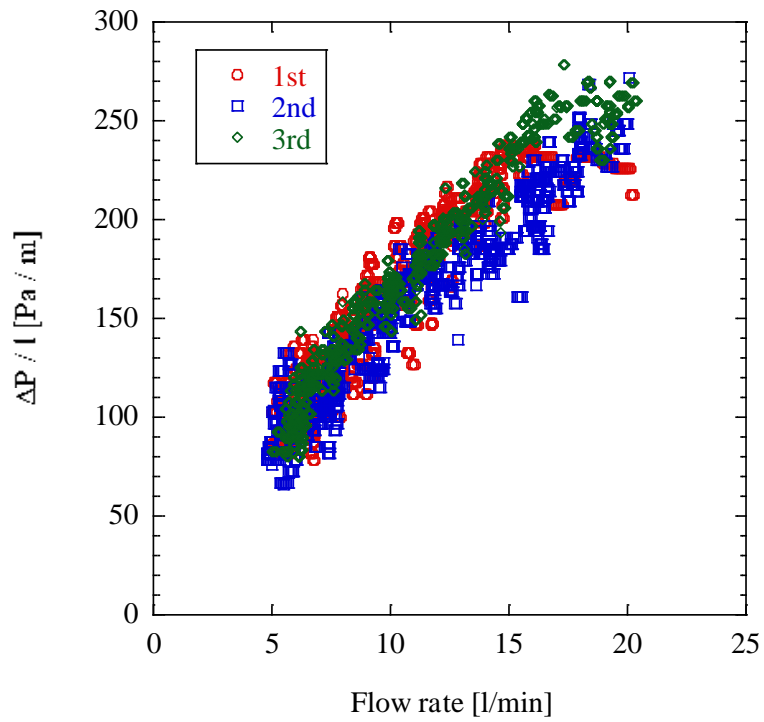


Fig.4-5 IPF = 10wt%における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

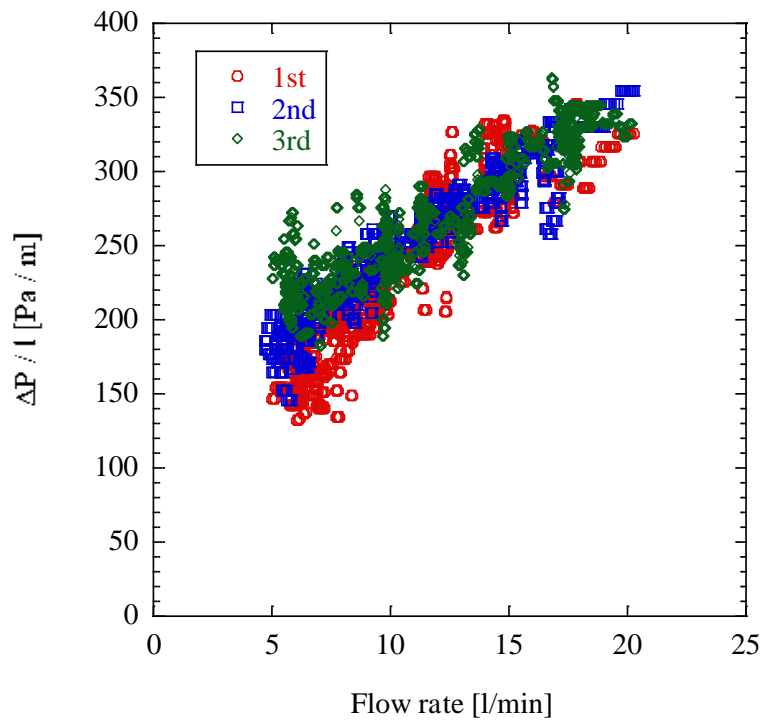


Fig.4-6 IPF = 15wt%における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

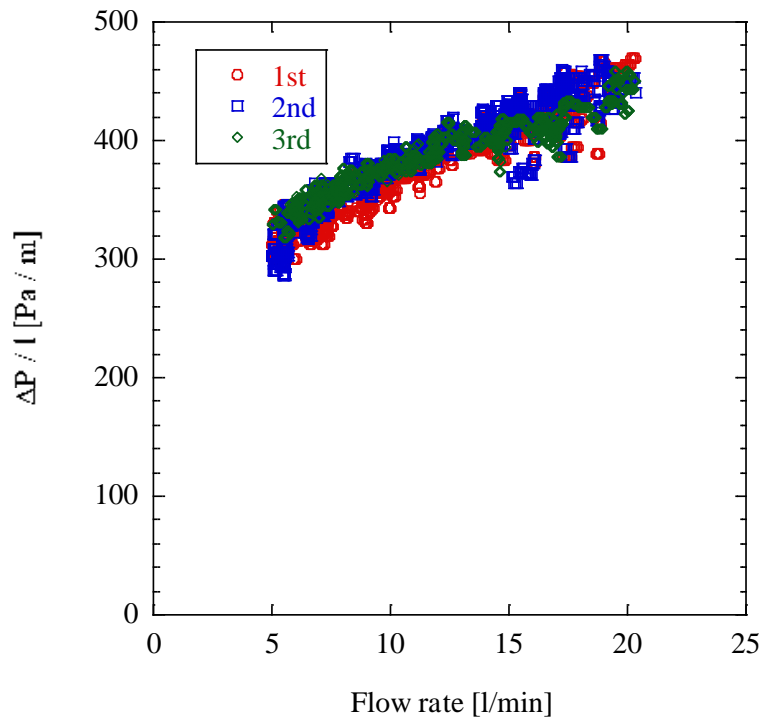


Fig.4-7 IPF = 20wt%における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

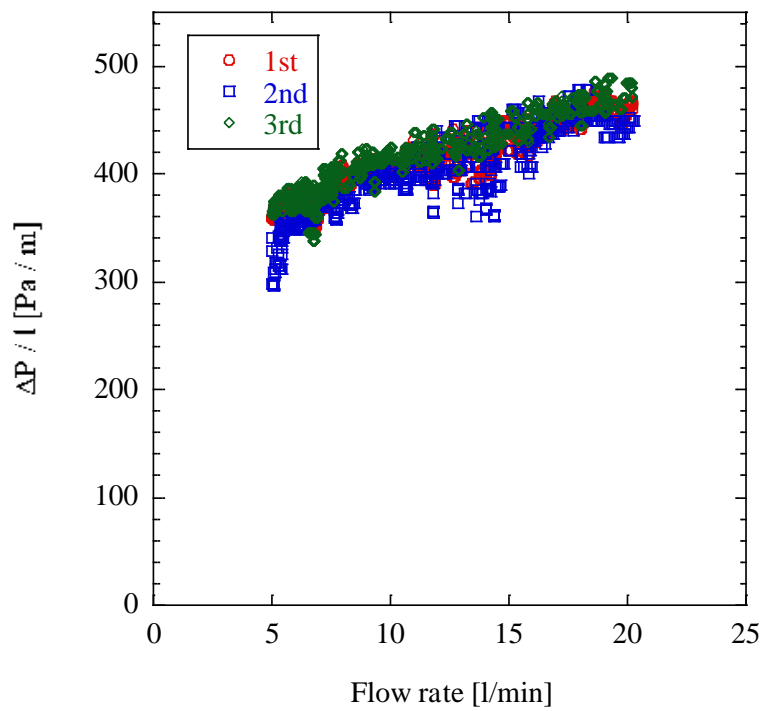


Fig.4-8 IPF = 25wt%における流量と単位長さ当たりの圧力損失の関係

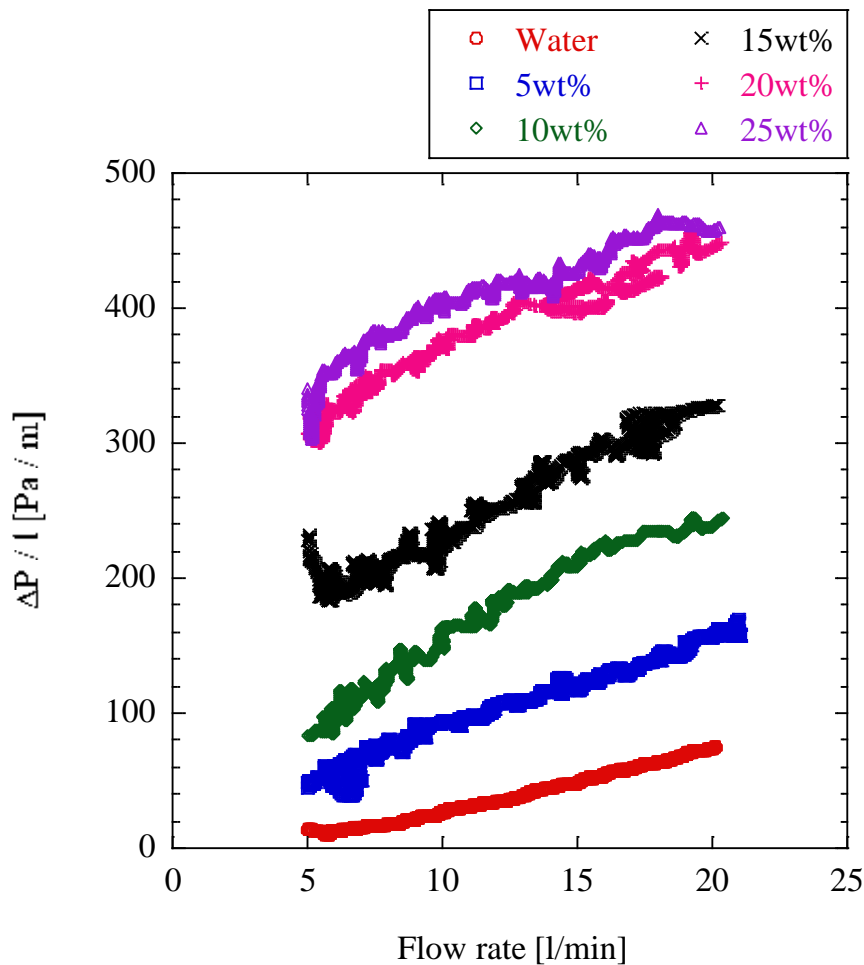


Fig.4-9 IPFごとの比較(5 秒平均)

4.4 考察

第3章での計測結果と比較し、より安定した計測結果が得られている。スラリーアイス生成後だけでなく、生成中にも攪拌を行ったことで、より氷粒子の凝集を防ぎ、タンク内を一樣な状態になったためであると考えられる。IPFの上昇に対して、圧力損失も上昇した。これは氷粒子の増加により管壁との摩擦が増大したためであると考えられる。

また、計測した圧力損失から流動特性について検討した。壁面せん断応力とせん断速度の関係を、圧力損失と体積流量の関係より、式(4.1)、(4.2)に示す Rabinowitch-Mooney の式⁴⁾より求めた。式(4.1)、(4.2)は層流域においてせん断応力とせん断速度の関係を求めることのできる式であるが、スラリーアイスの場合、粘性係数が不明なためレイノルズ数を計算することができない。しかし、氷粒子が混在することで、水と比較し、スラリーアイスの密度は小さくなり、粘性係数大きくなると考えられる。したがってレイノルズ数は同じ流速でも水より小さくなると考え、本実験装置で水の場合層流となる流速範囲においてせん断応力とせん断速度の関係を求めた。

$$\gamma = \left(\frac{3Q}{\pi R^3} \right) + \tau_w \left[\frac{d(Q/\pi R^3)}{d\tau_w} \right] \quad (4.1)$$

$$\tau_w = \frac{R\Delta P}{2l} \quad (4.2)$$

γ : せん断速度[1/s], Q : 体積流量[m³/s], R : 管の半径[m], τ_w : せん断応力[Pa],
 ΔP : 圧力損失[Pa], l : 測定長さ[m]

各IPFにおけるせん断速度とせん断応力の関係を Fig.4-10 に示す. いずれのIPFにおいても $\gamma = 0$ のとき, $\tau_w = 0$ とならず降伏応力が存在すると考えられる. また, IPFの増加に伴い降伏応力も増加する傾向にあると考えられる. 氷粒子の増加により, 管壁との摩擦力や, 氷粒子同士の凝集により降伏応力が存在するビンガム流体のような流動特性となったのではないかと考えられる.

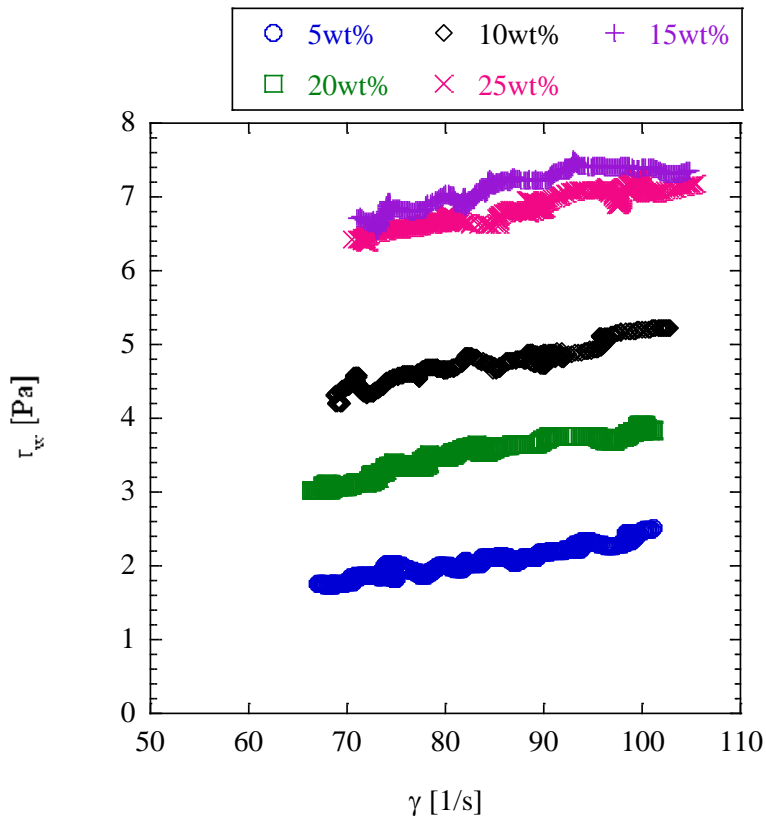


Fig.4-10 各IPFにおける流動曲線

第5章 結言

本研究では、差圧計を用いて圧力損失を計測し、スラリーアイスの圧力損失から流動特性の検討を行った。

角型タンクと循環型スラリーアイス製造装置を用いた実験では、まず実験装置の有効性を示すために物性値が既知の水を用いて圧力損失の計測を行った。計測値の平均値とダルシー・ワイズバッハの式より算出した計算値を比較し、同様の値を計測できることを確認し、本実験装置によりスラリーアイスの圧力損失を計測可能であることを示した。スラリーアイスの計測では氷粒子の凝集を防ぐため攪拌を行いながら計測し、 $IPF=15\text{wt}\%$ まで IPF の増加に伴い圧力損失も増加するという傾向が得られた。しかし、 $IPF \geq 20\text{wt}\%$ では計測値が大きく乱れ、流量計部において閉塞し、計測が行えなかった。 IPF の増加に伴い圧力損失も増加するという傾向が得られたが、計測値の乱れとスラリーアイスの閉塞により正しく計測が行えなかった。原因としては、攪拌による気泡の発生と、貯蔵タンクの面積に対し、攪拌機の翼直径が小さく攪拌が不十分であったと考え、課題を明確にした。

十分に攪拌が行える実験装置として、面積の小さい丸型タンクを用いた実験装置を製作した。角型タンクの場合と同様に実験装置の有効性を示すために物性値が既知の水を用いて圧力損失の計測を行った。計測値の平均値とダルシー・ワイズバッハの式より算出した計算値を比較し、同様の値を計測できることを確認し、本実験装置によりスラリーアイスの圧力損失を計測可能であることを示した。

すべての IPF において、 IPF の増加に伴い圧力損失も増加するという傾向が得られた。 IPF の上昇、すなわち氷粒子が増加したことにより、管壁との摩擦力が増加したためであると考えられる。

また、計測したスラリーアイスの圧力損失からせん断速度とせん断応力の関係を求め、流動特性の検討を行った。いずれの IPF においても降伏応力が存在するビンガム流体のような流動特性を示した。また、降伏応力は IPF の増加に伴い増加する傾向にあると考えられる。ビンガム流体のような流動曲線となった要因としては、氷粒子の増加により、管壁との摩擦力や、氷粒子同士の凝集により降伏応力が存在するようになったのではないかといえる。

参考文献

- 1) 松本泰典 スラリーアイス製造装置とその応用 ～生鮮魚介類の鮮度保持用の製氷装置と果汁などの凍結濃縮装置の開発～ 食品工業 Vol.55, No.12(2012), 別刷 pp4
- 2) 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(2017)
- 3) 森川敬信, 鮎川恭三, 辻裕 新版 流れ学 pp46
- 4) 川南剛, 山田雅彦, 池川昌弘, 田邊亘 氷スラリーの流動特性と熱伝達 第40回伝熱シンポジウム講演集, 2003

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導，ご教授頂きました高知工科大学システム工学群 松本泰典准教授に深く感謝いたします．また，ものづくり先端技術研究室の皆様には御指導御鞭撻を賜りました．ここに厚く御礼申し上げます．