

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

知能機械システム工学コース

ものづくり先端技術研究室 1225060 横山 皓平

1. 緒論

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程度の微小な氷粒子とNaCl水溶液が混在した流動性を有する冷却媒体である。1.0wt%~2.0wt%のNaCl水溶液または希釈海水からスラリーアイスを作成すると、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*)20~30wt%のスラリーアイスを作成すると、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凍結させず保存することが可能となる。

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、ポンプにて移送することが可能であるが、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に変化する。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。

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。

2. 丸型タンクを使用した実験

2.1 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。

2.2 実験方法

実験装置の概略をFig.1に示す。貯蔵用丸型タンク(カイスイマレン製、MH-140)に1wt%のNaCl水溶液を作成し、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作成した。なお、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。その後、内径32mmの亚克力パイプに5~20L/minで送液し、差圧計(長野計器製、GC50)により水および $IPF=5$ ~ $25\text{wt}\%$ の5wt%刻みで圧力損失を計測した。計測範囲は0.5mとし、亚克力パイプには、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。ポンプ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、各実験は3回行った。*IPF*は塩分濃度計(アタゴ製、PAL-SALT)により液体部の塩分濃度を計測し、式(2.1)より算出した。なお、初めに実験装置の有効性を確認するために物性値が既知の水で実験を行い、式(2.2)のダルシー・ワイスバッハの式より算出した²⁾。

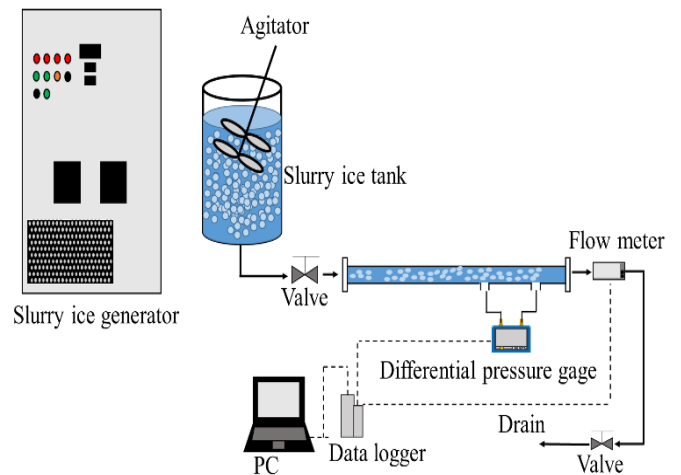


Fig.1 Schematic of experimental equipment

$$IPF = \frac{(A+B) \left(1 - \frac{a_0}{a_1}\right)}{A} \times 100 \quad (2.1)$$

A:タンク内NaCl水溶液質量[kg], B:ジェネレータ内NaCl水溶液質量[kg], a_0 :初期塩分濃度[wt%], a_1 :測定塩分濃度[wt%]

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (2.2)$$

ΔP :圧力損失[Pa], λ :管摩擦係数[-], l :測定区間[m], d :管内径[m], ρ :密度[kg/m³], w :流速[m/s]

2.3 実験結果および考察

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.2に示す。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。これは、氷粒子が増加することで、管壁との摩擦力が上昇したためであると考えられる。

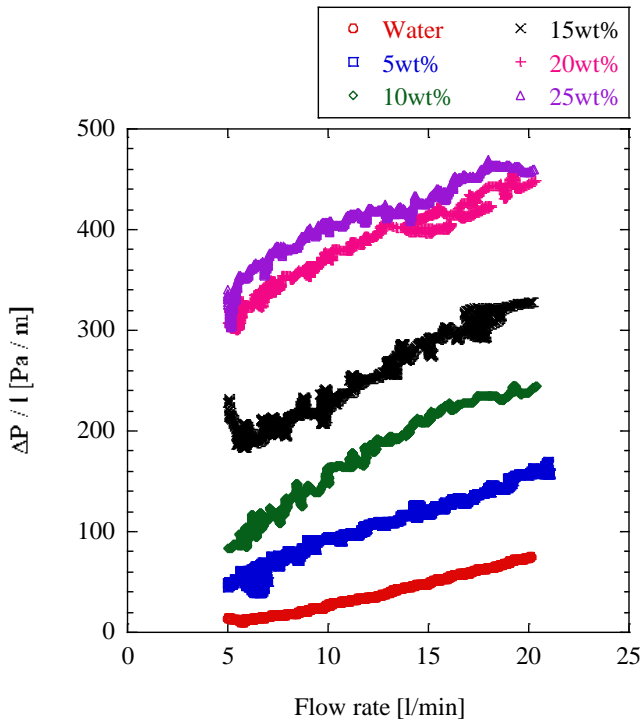


Fig.2 Relationship between flow rate and pressure drop per unit length

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(2.3), (2.4)に示す Rabinowitch-Mooney の式³⁾より求めた。式(2.3), (2.4)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、粘性係数は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。

$$\gamma = \left(\frac{3Q}{\pi R^3} \right) + \tau_w \left[\frac{d(Q/\pi R^3)}{d\tau_w} \right] \quad (2.3)$$

$$\tau_w = \frac{R\Delta P}{2l} \quad (2.4)$$

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.3 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。

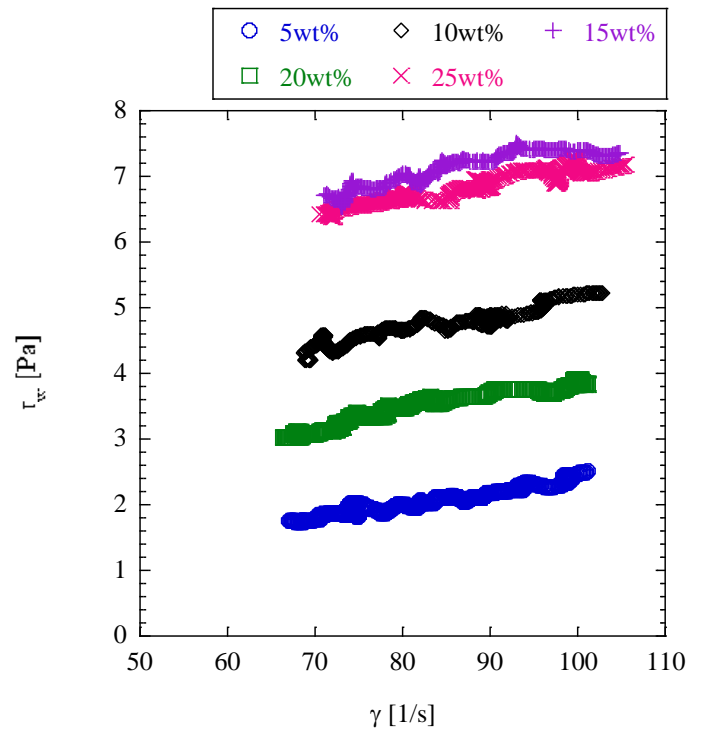


Fig.3 Flow curve at each IPF

3. 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。実験装置の有効性を示すために物性値の判明している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・ワイス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。

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結果と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) 森川敬信, 鮎川恭三, 辻裕 新版 流れ学 pp46
- (3) 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回伝熱シンポ講論集, 2003