

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

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1180089 高野 礼

1. 緒論

スラリーアイスとは、凍結濃縮や生鮮食品の鮮度保持に用いられ、粒子径が約 0.2mm と非常に微小な氷粒子が混在した溶液である。生鮮食品の中でも魚介類の凍結温度は-2~-1°C に分布しており、塩分濃度 1.0wt% の NaCl 水溶液からスラリーアイスを生成すると、氷充填率(以下、*IPF*:Ice Packing Factor)が 20~30wt% のとき、その温度は-0.9~-0.8°C となる。これにより、低温かつ魚が凍結しない温度を実現することができる。本研究では、*IPF* ≥ 25wt% のスラリーアイスを生成し、安定的に供給し続けることのできる製氷装置の研究開発を行っている。図 1 に本装置の概略を示す。ジェネレーターは 2 重円筒構造となっており、円筒間に冷媒を循環させ、タンク内の予冷された NaCl 水溶液をポンプでジェネレーターに送水し、内筒内壁面に氷膜が形成される。その氷膜を掻き取り刃で掻き取ることでスラリーアイスを生成し、排出時には *IPF* ≥ 25wt% のスラリーアイスを提供することができる。本装置の課題として、ジェネレーター内で生成されているスラリーアイスの *IPF* が 30wt% を超えてしまうと流動性が低くなり、氷粒子がジェネレーター内で閉塞することが挙げられる。そこで、生成されたスラリーアイスの *IPF* をリアルタイムで測定し、*IPF* の変化に応じて NaCl 水溶液の流量などを制御する必要がある。本研究では導電率を用いてスラリーアイスの *IPF* をリアルタイムで測定することのできるセンシング機器の開発を目的としている。

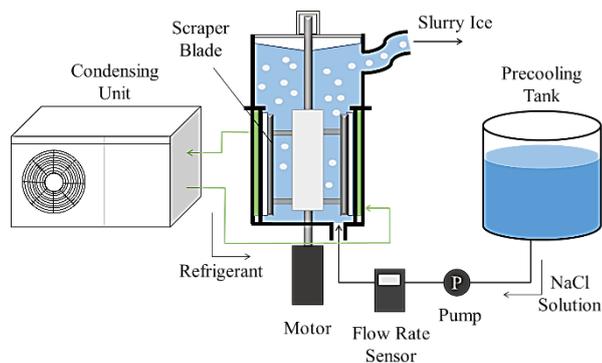


Fig.1 Slurry ice manufacturing equipment

2. 塩分濃度と導電率の関係

2.1 実験目的

25°C における NaCl 水溶液の塩分濃度と導電率の関係は、低濃度では線形的であると知られている。しかし、スラリーアイスは温度が -0.8~-0.9°C であるためこの温度帯での塩分濃度と導電率の関係についての文献は見られない。そこで本実験ではスラリーアイスの温度帯での塩分濃度と導電率の関係を定量的に求めることを目的とした。

2.2 実験方法

塩分濃度 0.5~4.5wt% の範囲で 0.5wt% の間隔の濃度となる NaCl 水溶液をサンプルに、これを -2~-2°C まで 1°C ずつ変化させた。このとき、濃度が一樣になるように攪拌機を用

いて、導電率を測定した。

2.3 実験結果

塩分濃度毎の各温度に対する導電率の変化を図 2 に示す。いずれの温度でも 25°C のときと同様に線形的な関係が見られた。

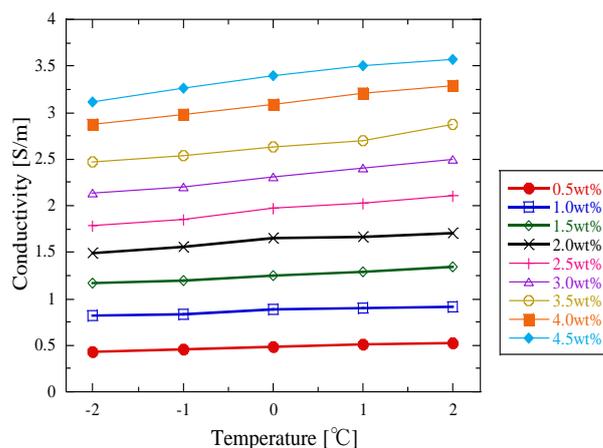


Fig.2 Relationship salinity and conductivity

2.4 考察

NaCl 水溶液のいずれの濃度においても、-2~2°C の温度帯における導電率の挙動は 25°C のときと同様に塩分濃度 x と導電率 k の関係は線形的な関係にある。このことから、式 (1) のように表すことができる。

$$k = ax \quad (1)$$

ここで a は実験的に求めることのできる定数である。

3. 不導体の存在による導電率の変化

3.1 実験目的

導電率を用いた *IPF* 測定では、不導体である氷粒子の存在が導電率に影響を与えることが考えられる。そこで本実験では、不導体の充填率に対する導電率の変化を定量的に評価することを目的とした。

3.2 実験方法

本実験では不導体である氷粒子の代わりに、雰囲気においても状態が定常であるガラスビーズを用いた。ガラスビーズが混在した塩分濃度 1.0, 1.3, 1.5, 2.0wt% の NaCl 水溶液をサンプルに、これを -2~2°C の範囲で 1°C ずつ変化させ、不導体が均一になるように、攪拌翼の回転数 360min^{-1} にて攪拌をしながら導電率を測定した。ガラス充填率(以下、*GPF*:Glass Packing Factor)はスラリーアイスの *IPF* が 0~25wt% のときと同じ体積となるようにした。

3.3 実験結果

ここでは、-1°C の結果を図 3 に示す。全ての塩分濃度で *GPF* が増加することにより、導電率が減少する傾向が得られた。また、濃度が高くなるにつれて *GPF* の増加に対して減少する導電率の割合が大きくなっていることがわかる。

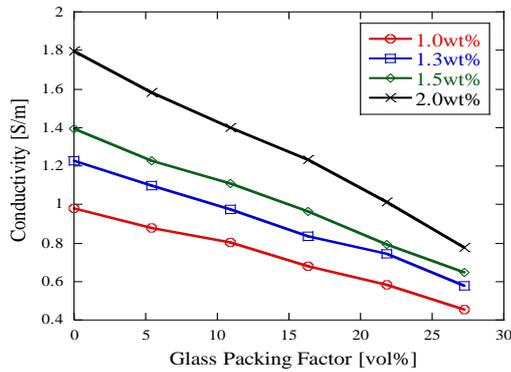


Fig.3 Change in conductivity by GPF increase

3.4 考察

GPFの増加により導電率が線形的に減少していることから、図4に示すように導電率が0になるときのGPFが存在すると考えられる。近似式より各温度、各濃度の導電率が0になるGPFを GPF_0 とし、これらの平均をとると $GPF_0 = 52.2\%$ となった。この充填率は粒子が均一な大きさと仮定したとき、単純立方格子の配列に相当する。 GPF_0 および $GPF = 0\%$ のときの導電率 k_T を用いると、GPFと導電率の関係式は式(2)で表すことができる。

$$k = -\frac{k_T}{GPF_0} GPF[\text{vol}\%] + k_T \quad (2)$$

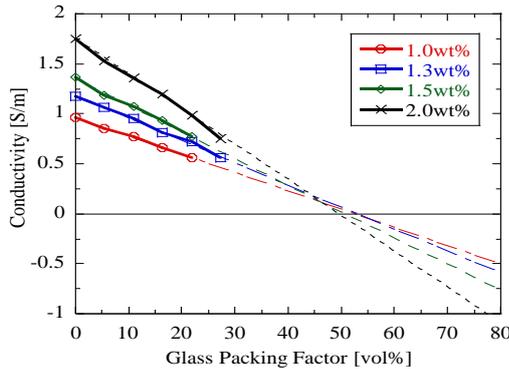


Fig.4 Relationship GPF and conductivity using approximate line

4. スラリーアイスにおける導電率を用いたIPF測定

4.1 実験目的

従来、IPF測定は排出されたスラリーアスを固液分離した後、溶液を常温に戻してから塩分濃度を測定し、式(3)よりIPFを算出するサンプリング方式となっている。しかしこの方法ではタイムラグが生じてしまい、ジェネレーター内でのIPFをリアルタイムで把握することができない。そこで、ジェネレーター内のスラリーアスの導電率を測定し、IPFの計測が可能であるかを実験的に調べた。

$$IPF[\text{wt}\%] = \left(1 - \frac{x_0}{x_T}\right) \times 10^2 \quad (3)$$

4.2 実験方法

図5に示すようにジェネレーター内にセルを取り付け、5分おきにデジタルマルチメーターの表示される電流値を有効性を確認するため、3回連続で読み取り、その平均値を用いて導電率を求めた。同時にサンプリング方式でもIPF測定を行った。初期塩分濃度の導電率を k_0 、測定塩分濃度の導電率を k_T とすると、式(3)は式(1)より次式で表される。

$$IPF[\text{wt}\%] = \left(1 - \frac{k_0}{k_T}\right) \times 10^2 \quad (4)$$

また、スラリーアスの全体の質量 $M[\text{kg}]$ 、氷の質量 $a[\text{kg}]$ としたとき、 $IPF[\text{wt}\%]$ は次式で表される。

$$IPF[\text{wt}\%] = \frac{a}{M} \times 10^2 \quad (5)$$

なお、スラリーアスの液体部分の密度 ρ_w 、氷の密度 ρ_{ice} とすると、 $IPF[\text{vol}\%]$ は次式で表される。

$$IPF[\text{vol}\%] = \frac{\frac{a}{\rho_{ice}}}{\frac{M-a}{\rho_w} + \frac{a}{\rho_{ice}}} \times 10^2 \quad (6)$$

ここでガラスビーズと氷粒子の体積は同じとしたとき、

$$GPF[\text{vol}\%] = IPF[\text{vol}\%] \quad (7)$$

となる。式(2)、(4)~(7)よりジェネレーター内が満水となったときに初期導電率 k_0 を測定し、その後5分おきに導電率 k を測定し、 $IPF[\text{wt}\%]$ を算出した。

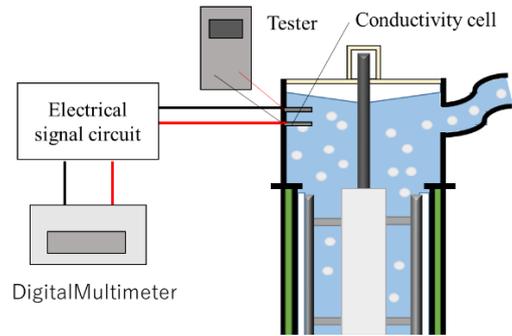


Fig.5. Mounting position of cell

4.3 実験結果

実験結果を図6に示す。なお、本図には冷凍能力から算出した試算IPFも記載している。IPFが安定する約30分まではセル方式とサンプリング方式で約10%の差となった。しかしIPFが30%付近で安定してからはIPF差が約3%となり、セル方式を用いてもサンプリング方式のIPFとほぼ同等の値となった。

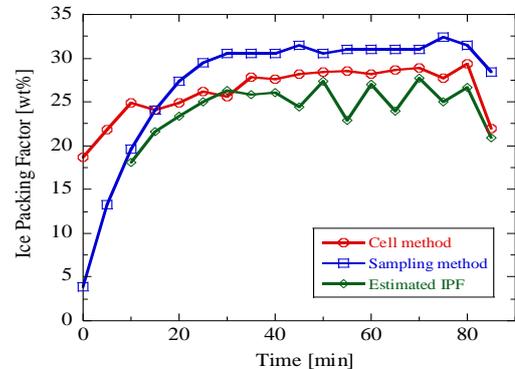


Fig.6 Experimental result

4.4 考察

本実験では初期導電率 k_0 を予冷されたNaCl水溶液の温度約5°Cで測定しているが、実際のスラリーアイス生成時の温度は約-0.8°Cであり、氷増加だけではなく、温度低下による導電率減少も含まれており、IPFに差が出たと考えられる。

5. 結論

実験より導電率とIPFの関係式を導出しスラリーアスのIPF測定を行った。その結果、導電率の有効性が確認できた。今後は、初期のIPFも正確に測定できるように検討していく必要がある。

文献

- 渡辺悦生, “魚介類の鮮度と加工・貯蔵”
- 杵嶋修三, “導電率(イオン量)の計測<第2版>”