

# スラリーアイスにおける氷充填率のリアルタイム計測法についての研究

ものづくり先端技術研究室 1170038 角中 和人

## 1. 緒言

スラリーアイスとは粒子径が 0.1~0.3mm の氷粒子と液体が混在した液状氷のことで、塩分濃度 1wt% の希釈海水または NaCl 水溶液から製氷したとき、氷充填率(以下、*IPF*:Ice Packing Factor)が 30% 以下の場合に攪拌混合すると流動性を有している<sup>1)</sup>。本研究では、安定的に *IPF*=25% のスラリーアイスを生産することが可能な製氷装置の研究開発を行っている。本装置の概略は、図 1-1 に示すようにジェネレータ下部が 2 重円筒構造になっており、2 重円筒間に冷媒を循環させ、内筒内に NaCl 水溶液を通過させることにより、内円筒内壁面に氷膜を形成する。そして氷膜を掻き取り刃によって連続的に掻き取ることによりスラリーアイスを生産する 2 重円筒掻き取り構造になっている。現在本装置の課題として、製氷運転時にスラリーアイスが *IPF*=30% を超えると流動性が無くなり、掻き取り負荷が増大することで製氷を行えなくなることがあげられる。したがって生成されたスラリーアイスの *IPF* をリアルタイムで計測し、フィードバック制御により、*IPF* の安定化を図る必要がある。現在の *IPF* 計測は、サンプリング方式である。生成されたスラリーアスを固液分離した後に塩分濃度測定を行い、氷生成前の塩分濃度  $x_0$  [wt%] と氷の発生により塩分濃度が上昇した溶液のサンプリング時の塩分濃度  $x_T$  [wt%] を用いて

$$IPF = 10^2 \left( 1 - \frac{x_0}{x_T} \right) \quad (1)$$

より算出している。そのため測定にタイムラグが生じ、生成しているスラリーアイスの *IPF* がリアルタイムに計測できない。そこで本研究では、導電率によりこれらの前処理を行うことなく *IPF* をリアルタイムに計測することの可能なセンシング機器の開発を目的とする。

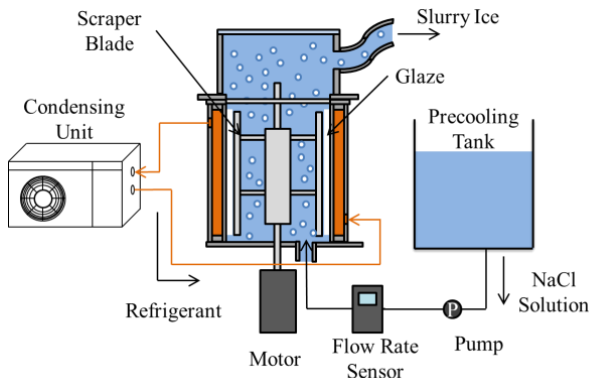


Fig.1-1 Slurry Ice Generator

## 2. 不導体の存在による導電率変化の測定実験

### 2-1. 実験目的

スラリーアイスとは、溶液内に不導体である氷粒子が存在しているため、導電率の計測に影響を与えることが考えられる。しかし不導体粒子が混在した電解質溶液について、不導体粒子の充填率と導電率の関係は定量的に明らかにされていない。本実験では、不導体粒子の充填率に対する NaCl 水溶液の導電率を定量化することを目的とした。

### 2-2. 実験方法

本実験では、氷粒子の代わりに溶液内で粒子同士の固着が生じないガラス粒子(粒子径 50 $\mu$ m)を用いてまずは実験を行った。NaCl 水溶液の塩分濃度を 0.5~2.0wt% まで変化させ、各 NaCl 水溶液に対してガラス粒子の充填率(以下、*GPF*:Glass Packing Factor)はガラス粒子と氷粒子の密度を考慮して存在割合を近似するために、質量 *IPF*=0~35wt% を体積 *IPF* に換算したときの体積 *GPF* を用いた。ガラス粒子を攪拌機(IKE EURO STAR 20 digital)を用いて攪拌し、試作した銅製の導電率セル(縦 12mm, 横 7mm)をセル間距離 47mm で用いて導電率測定を行った。

### 2-3. 実験結果と考察

実験結果を図 2-1 に示す。いずれの濃度の NaCl 水溶液も *GPF* の増加に対して導電率は線形的に減少しており、また塩分濃度  $x_T$  [wt%] が高くなるほどその勾配が大きくなっていることがわかった。この塩分濃度と不導体の充填率に対する導電率の低下量の関係は、勾配  $a = 0.0367x_T$  で近似されることがわかった。

この結果より、塩分濃度  $x_T$  [wt%] のとき測定された導電率  $k_T'$  [S/m] に対して不導体が無いときの導電率  $k_T$  [S/m] は

$$k_T = k_T' + ax_T GPF \quad (2)$$

で求められることがわかった。

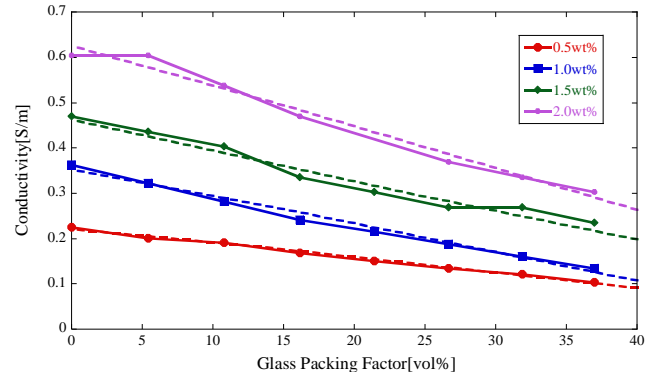


Fig.2-1 Correlation between Conductivity and *GPF*

## 3. スラリーアイスの導電率測定実験

### 3-1. 実験目的

本装置において、生成されているスラリーアイスの *IPF* をリアルタイムに測定することは、目標である *IPF*=25% を保持したスラリーアスを安定的に生成する上で最も重要となる。そこで、ジェネレータ内部に新たに試作した導電率計を取り付け、実験を行った。これにより *IPF* の変化による塩分濃度の変動、および不導体の充填率に対する導電率への影響を考慮した導電率の算出を行い、*IPF* および導電率の関係を形式化することにより、*IPF* のセンシング法を確立することを目的とした。

### 3-2. 実験方法

ジェネレータ内上部側面にプラチナメッキチタン製の導電率セル(縦 15mm, 横 10mm)をセル間距離 15mm で図 3-1 に示すように取り付け、製氷中のジェネレータ内部の導電率の測定を行

った。このときジェネレータ内の流れは旋回流が支配的であるため、セルの平面が流れの方向に対して平行になるように取り付け、2パターンの実験を行った。1つは、ジェネレータ内を掻き取り刃のみで攪拌を行い(以下、実験①)、もう1つは、図3-2に示すようにジェネレータの中心部に羽を取り付け、上部の攪拌を促しての実験を行った(以下、実験②)。また導電率の測定と同時に従来のサンプリング方式で *IPF* 測定を行い、導電率と *IPF* の関係を算出した。

ここで塩分濃度と導電率の関係は線形で近似されることが知られており、勾配を  $b$ 、導電率を  $k_T$  [S/m]、塩分濃度を  $x_T$  [wt%] とすると、

$$k_T = bx_T \quad (3)$$

で表される<sup>2)</sup>。ここで式(1)~(3)を用いて *IPF* の変化による塩分濃度の変動および、スラリーアイスの製氷による塩分濃度の変化による導電率および不導体の充填率による影響の変化について考慮した導電率  $k$  [S/m] は

$$k = k_T \left(1 - \frac{IPF}{10^2}\right) + \frac{IPF}{10^2} x_0 a \quad (4)$$

より求められる。この式に本実験の実験値を代入することにより、塩分濃度変化の影響を取り除いた同一塩分濃度における導電率と *IPF* の関係が求められると考えた。

### 3-3. 実験結果と考察

式(5)に本実験の値を代入した結果を図3-3に示す。この結果より氷粒子の充填率に対して塩分濃度変化の影響を取り除いた導電率は、初期導電率から勾配  $c=0.0567$  で減少していると近似できることがわかった。したがって同一塩分濃度における導電率  $k$  [S/m] は、

$$k = k_0 - cIPF \quad (5)$$

で求めることができる。したがって式(4)は式(5)より

$$k_T \left(1 - \frac{IPF}{10^2}\right) + \frac{IPF}{10^2} x_0 a = k_0 - cIPF \quad (6)$$

となり、この式を  $IPF > 0$  について展開すると

$$\frac{IPF}{2(x_0 a)} \left[ -(k_T - 10^2 c) + 10 \sqrt{\frac{(k_T - 10^2 c)^2}{10^2} - 4(x_0 a)(k_T - k_0)} \right] \quad (7)$$

より求められることがわかった。

実験①および実験②についてこの式を用いた *IPF* の計算値とサンプリングにより測定した値を図3-4、図3-5に示す。実験①において計算値は、サンプリング方式により求めた実測値に対して誤差が生じているが、その誤差の範囲は  $-4.4 \sim 4.5$  [wt%] 程度でありほぼ一致しているという結果が得られた。ここで誤差が生じた原因として、ジェネレータ内を掻き取り刃のみで攪拌を行ったため旋回流が支配的であり、ジェネレータ内に *IPF* の偏りが生じたためだと考えられる。

実験②においても *IPF* の計算値は、実測値に対して同様の傾向は得られた。しかし計算値が実測値に対して大きく誤差が生じている部分が存在した。これは、ジェネレータ内部に取り付けた羽により、旋回流に上下流が加わったために旋回流に対して平行に取り付けた導電率セルの間に氷粒子が均一に通過しなくなったためだと考えられる。

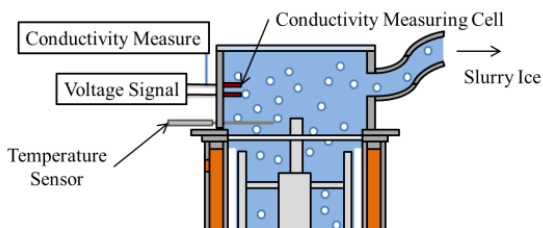


Fig.3-1 Installation of Conductivity Measuring Cell

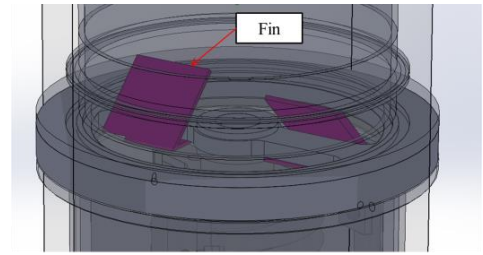


Fig.3-2 Installation of Fins

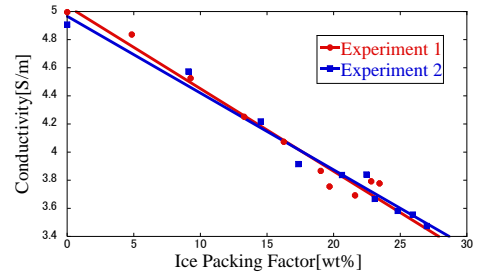


Fig.3-3 Correlation between Conductivity and *IPF*

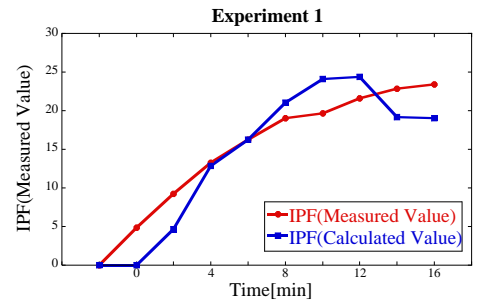


Fig.3-4 Comparison of Calculated and Measured Value of *IPF*

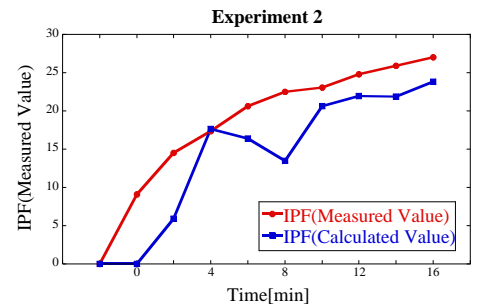


Fig.3-5 Comparison of Calculated and Measured Value of *IPF*

## 4. 結言

本研究によりスラリーアイスの *IPF* と導電率の関係を確認することが出来た。しかし誤差の大きい部分などが存在する。そのため今後は、導電率測定の精度を高めるため、ジェネレータ内部のスラリーアイスの一様攪拌ができるように内部構造を変更する、あるいは測定点を複数箇所に入れてその平均値を *IPF* の算出に用いるなどの検討が必要である。また、不導体の充填率と導電率の関係をガラス粒子による近似で行ったが、ガラス粒子と氷粒子では誘電率などの電気的な特性が異なる。そのため氷粒子の誘電率や液体中での表面性状についても検討する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) スラリーアイスを用いたハタハタの効率的な冷却と輸送  
志村健 2015
- 2) 日本分析機器工業会  
<http://www.jaima.or.jp/jp/basic/electrochem/ec.html>