

# 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

## Real time ice packing factor measurement through electrical conductivity

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 1225033 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 200 $\mu\text{m}$ と非常に微小な氷粒子が混在した液状氷である。生鮮食品の中でも魚介類の凍結温度は $-2\sim-1^\circ\text{C}$ に分布しており<sup>(1)</sup>、塩分濃度 1.0wt%の NaCl 水溶液からスラリーアスを生成すると、氷充填率(以下、*IPF*: Ice Packing Factor)が 20~30wt%のとき、その温度は $-0.9\sim-0.8^\circ\text{C}$ となる<sup>(2)</sup>。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、 $IPF \geq 25\text{wt}\%$ のスラリーアスを生成し、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。本装置の概略を図 1 示す。ジェネレーターは 2 重円筒構造となっており、円筒間に冷媒を供給し、タンクから送水された NaCl 水溶液を冷却する。十分に冷却後、内筒内壁面に形成された氷膜を掻き取り刃で掻き取り、NaCl 水溶液中に氷粒子を浮遊させることでスラリーアスを生成する。本装置の課題として、ジェネレーター内の *IPF* が 30wt% を超えると流動性が低下してしまい、氷粒子がジェネレーター内で堆積し、スラリーアスを供給することが困難になってしまう。そこで、生成されたスラリーアスの *IPF* をリアルタイムで測定し、*IPF* の変化に応じて NaCl 水溶液の供給流量などを制御する必要がある。現在、*IPF* 測定は生成されたスラリーアスを固液分離し、溶液の塩分濃度を測定することにより、

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

から *IPF* を算出するサンプリング方式を用いている。 $x_0$  は初期塩分濃度 [wt%]、 $x_T$  はスラリーアイス生成後の塩分濃度 [wt%] である。しかし、この方法ではタイムラグが生じ、ジェネレーター内の *IPF* をリアルタイムで把握することができない。そこで、本研究では導電率を用いてスラリーアスの *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研究開発を目的としている。

- ① Tank
- ② Valve
- ③ Pump
- ④ Check valve
- ⑤ Needle valve
- ⑥ Flow sensor
- ⑦ Motor
- ⑧ Drain valve
- ⑨ Cooling machine
- ⑩ Generator

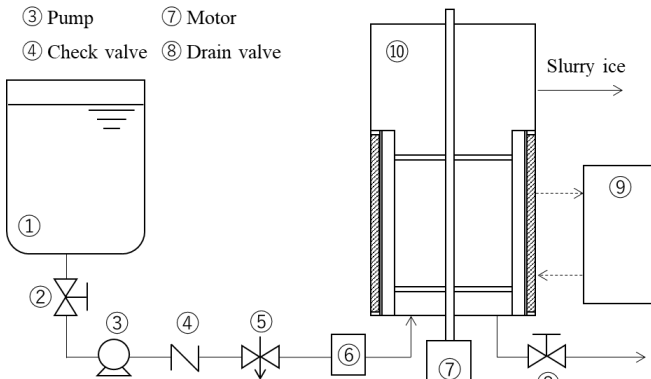


Fig. 1 Flow diagram of slurry ice making

### 2. 塩分濃度と導電率の関係

#### 2.1 目的

25 $^\circ\text{C}$  の NaCl 水溶液における塩分濃度と導電率の関係は、低濃度のときに線形的であることが知られている。しかし、スラリーアスの温度は  $0^\circ\text{C}$  以下であり、この温度帯での塩分濃度と導電率の関係が 25 $^\circ\text{C}$  と同様に線形性であるかの研究報告は見られない。そこで、本実験ではスラリーア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

NaCl 水溶液(塩分濃度 0.5~4.5wt% の範囲で 0.5wt% 間隔)の溶液温度を  $-2\sim 2^\circ\text{C}$  の範囲において  $1^\circ\text{C}$  間隔で変化させ計測した。このとき、濃度が一樣になるように攪拌を行いながら溶液に浸漬させたセルに  $\pm 5\text{V}$  の電圧を印加し、得られた電流値から導電率を算出した。

#### 2.3 実験結果

塩分濃度と導電率の関係を図 2 に示す。何れの温度においても塩分濃度が高くなるにしたがって導電率は線形的に増加しており、25 $^\circ\text{C}$  の場合と同様の関係を示した。

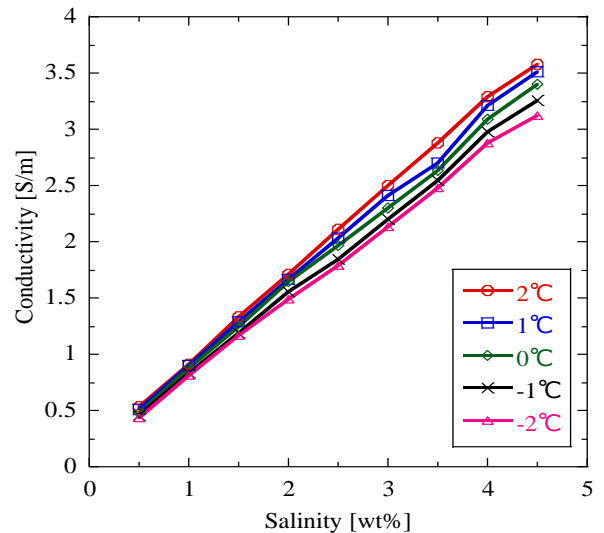


Fig. 2 Effect of salinity on conductivity

#### 2.4 考察

温度一定のとき塩分濃度  $x$  [wt%] と導電率  $k$  [S/m] は線形的な関係にあることから、勾配  $a$  とすると、

$$k = ax \quad (2)$$

とおくことができる。各温度での勾配  $a$  を表 1 に示す。*IPF* = 0~30wt% の範囲において温度変化は  $0.3^\circ\text{C}$  であり、これによる導電率の変化は 1.2% 程度である。しかし、塩分濃度は約 0.42wt% 変化するため、導電率の変化は 30% 以上となる。このことより、スラリーアスの *IPF* 測定において温度による導電率の変化は無視できるものとし、式(2)の関係が成り立つ。

Table 1 Slope  $a$  at each temperature

Temperature [°C]	$a$
-2	0.7135
-1	0.7392
0	0.7716
1	0.7969
2	0.8239

### 3. 不導体と導電率の関係

#### 3.1 目的

スラリーアイスの $IPF$ をリアルタイム計測するために導電率を用いる理由は、不導体である氷粒子の存在により導電率が影響を受け、 $IPF$ が変化したときに導電率の値もそれに追従するからである。しかし、 $IPF$ と導電率の関係については定量的に明らかにされていない。また、氷粒子は融解してしまうため、安定的な実験を行うことが困難である。このことから、本実験ではガラスビーズを用いて、不導体の充填率に対する導電率の変化を定量的に得ることを目的とした。

#### 3.2 実験方法

ガラスビーズが混在した塩分濃度 1.0, 1.3, 1.5wt% の NaCl 水溶液の溶液温度を 0~2°C の範囲において 1°C 間隔で変化させた。このとき、濃度およびガラスビーズが一様に溶液内で分散するように 1000min<sup>-1</sup> で攪拌を行いながら溶液に浸漬させたセルに±1.5V の電圧を印加し、得られた電流値から導電率を算出した。ガラス充填率(以下、 $GPF$ : Glass Packing Factor)は $IPF$ が 0~25wt% のときと等しい体積になるようにした。また、ガラスビーズは中心粒径の異なる 3 種類のものを使用した。

#### 3.3 実験結果

サンプルが 0°C のときの $GPF$ と導電率の関係を図 3 に示す。 $GPF$ が増加すると、導電率は線形的に減少するという傾向が得られた。また、ガラスビーズの粒子径によって導電率の低下率が異なっていることがわかる。

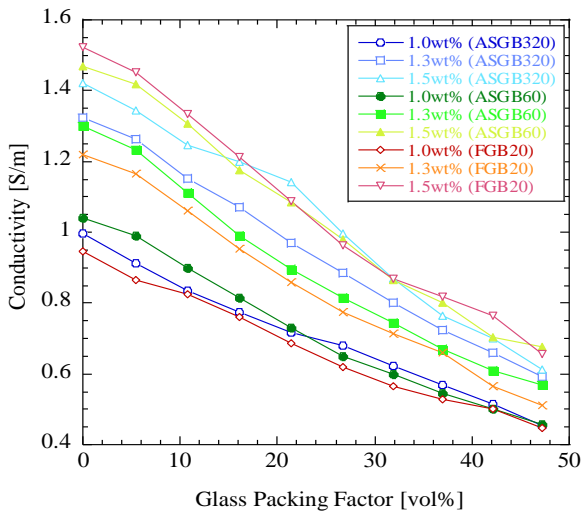


Fig. 3 Effect of glass packing factor on conductivity

#### 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、導電率が 0 となる $GPF_0$ [vol%]の値を近似的に求めることができる。そこで近似式から得られたガラスビーズ別の $GPF_0$ の平均値を表 2 に示す。ガラスビーズの粒子径が大きいほど $GPF_0$ の値が小さくなる傾向が見られる。ここで、スラリーアイス中に混在する氷粒子の粒子径は約 200 $\mu$ m であり、本実験で

使用したガラスビーズでは ASGB60 が最も近いことから、スラリーアイスの $IPF$ 測定では $GPF_0 = 80.01$ vol%を用いることとした。 $GPF_0$ および $GPF=0\%$ の導電率 $k_T$ [S/m]を用いると、 $GPF$ [vol%]と導電率の関係式は、

$$k = -\frac{k_T}{GPF_0} GPF[\text{vol}\%] + k_T \quad (3)$$

となる。また、 $GPF$ と $IPF$ は体積が等しいことから、

$$GPF[\text{vol}\%] = IPF[\text{vol}\%] \quad (4)$$

である。さらに、氷の密度 $\rho_{ice}$ [kg/cm<sup>3</sup>]、水の密度 $\rho_w$ [kg/cm<sup>3</sup>]を用いると $IPF$ [vol%]と $IPF$ [wt%]には、

$$IPF[\text{vol}\%] = \frac{10^2 IPF[\text{wt}\%] \rho_w}{10^2 \rho_{ice} - IPF[\text{wt}\%] (\rho_{ice} - \rho_w)} \quad (5)$$

の関係が成り立つ。ここで式(1), (2)より、

$$IPF[\text{wt}\%] = 100 \left( 1 - \frac{k_0}{k_T} \right) \quad (6)$$

となる。 $k_0$ [S/m]はスラリーアイス生成前のNaCl水溶液の導電率(初期導電率)、 $k_T$ [S/m]は生成中のNaCl水溶液の導電率、すなわち式(3)から求められる $k_T$ [S/m]と同等の導電率を示している。式(3)~(6)より初期導電率 $k_0$ [S/m]および生成中のスラリーアイスの導電率 $k$ [S/m]を測定することにより、 $IPF$ [wt%]を求めることが可能となる。

Table 2 Average of  $GPF_0$  with different glass bead

Model number	Average
ASGB320(38~53 $\mu$ m)	84.18
ASGB60(250~355 $\mu$ m)	80.01
FGB20(710~1000 $\mu$ m)	78.24

### 4. 導電率を用いたスラリーアイスの $IPF$ 測定

#### 4.1 目的

常温で粒子の形状が定常であるガラスビーズを用いて $GPF$ と導電率の関係を調べたところ、導電率は $GPF_0$ に収束する傾向が得られた。そこで、スラリーアイス生成中の導電率を測定し、ガラスビーズ実験から得られた $GPF_0 = 80.01$ vol%が $IPF$ 測定に有効であるかを調べた。

#### 4.2 実験方法

図 4 に示すようにジェネレーター内上部に取り付けたセルに±1.5V の電圧を印加し、30 秒間隔でセル間の電圧、電流値をデジタルマルチメーターで計測し、その値を PC に収集することで、導電率の計算および $IPF$ の算出を行った。また、サンプリング方式でも 5 分間隔で $IPF$ 測定を行った。攪拌速度は 300min<sup>-1</sup>とした。

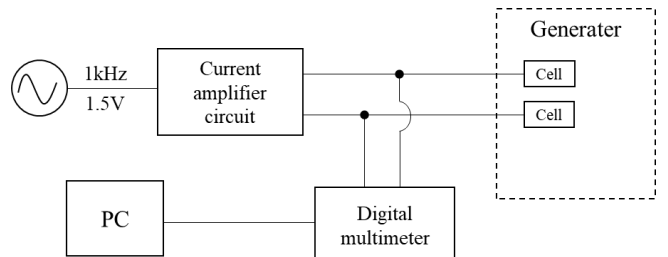


Fig. 4 Conductivity measurement method

#### 4.3 実験結果

サンプリング方式および導電率を用いたセル方式により測定したスラリーアイスの $IPF$ を図 5 に示す。本実験ではサンプリング方式で測定した $IPF$ を基準としており、セル方式はサンプリング方式の $IPF$ と等しくなることが望ましい。しかし、サンプリング方式とセル方式では $IPF$ に差が生じ、 $IPF$ が安定する 60 分以降での $IPF$ 差は 10wt%以上となった。

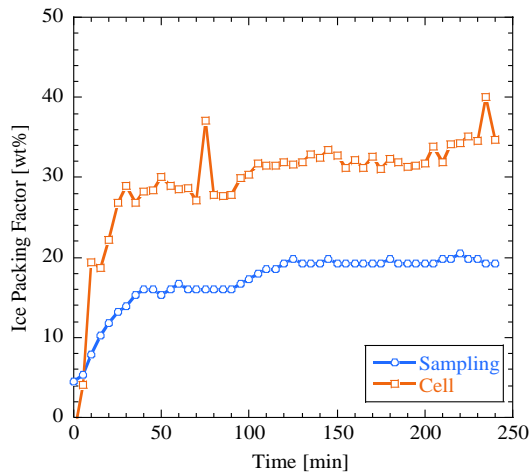


Fig. 5 Ice packing factor measurement result

#### 4.4 考察

ガラスビーズを用いて得られた $GPF_0$ がスラリーアイスの $IPF$ 算出に適さず、サンプリング方式の $IPF$ と10wt%以上の差が生じた。ここで、野村らによると、導電率低下率は粒子の成分により異なるということが報告されている<sup>(3)</sup>。このことより、ガラスビーズと氷粒子の違いで、導電率の低下率が異なっていると考えられる。ここで、式(6)より $k_T$ [S/m]について展開すると、

$$k_T = \frac{-100k_0}{IPF[wt\%] - 100} \quad (7)$$

となる。 $k_0$ [S/m]、 $IPF$ [wt%]の値を用いると、サンプリングを行ったときの塩分濃度の導電率 $k_T$ が求まる。実験中に測定した導電率 $k$ [S/m]は氷粒子によって $k_T$ から導電率が低下した値であるため、氷粒子による導電率の低下率 $\alpha$ [-]は、

$$\alpha = \frac{k}{k_T} - 1 \quad (8)$$

となる。図6より、 $IPF = 1\text{vol\%}$ あたり導電率は1.59%低下しており、導電率の低下率が100%、すなわち導電率が0となる $IPF_0$ は62.89vol%である。同様に $GPF$ [vol%]と導電率の低下率について求めると、図7より $GPF = 1\text{vol\%}$ あたり導電率は1.26%低下しており、 $GPF_0 = 79.36\text{vol\%}$ となる。近似式より算出した $GPF_0 = 80.01\text{vol\%}$ と非常に近い値を示していることから、導電率の低下率から $IPF_0$ を算出することが可能であることがわかる。また、 $IPF_0$ と $GPF_0$ は約17vol%の違いがあり、これによって $IPF$ 差が生じたと考えられる。従って、スラリーアイスの $IPF$ 測定では、 $IPF_0 = 62.89\text{vol\%}$ を用いる必要がある。

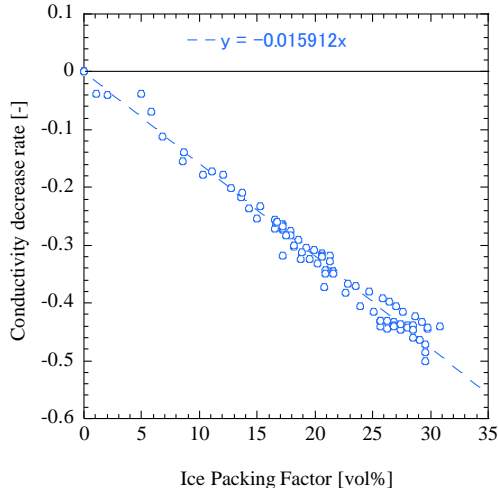


Fig. 6 Effect of  $IPF$  on conductivity decrease

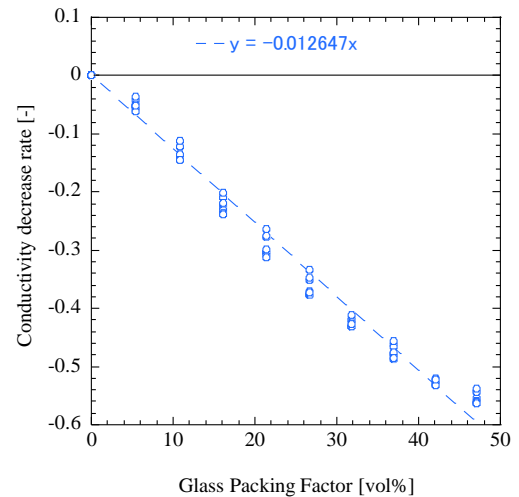


Fig. 7 Effect of  $GPF$  on conductivity decrease rate

$IPF_0 = 62.89\text{vol\%}$ を用いた場合のサンプリング方式の $IPF$ [wt%]を横軸、セル方式の $IPF$ [wt%]を縦軸とした実験結果を図8に示す。許容誤差として点線はサンプリング方式の $IPF$ から $\pm 2\text{wt\%}$ の値を示している。点線で示す範囲内にほぼすべてのプロットが収まっていることから、導電率と $IPF$ の関係式および $IPF_0$ の有効性を確認することができたと考えられる。

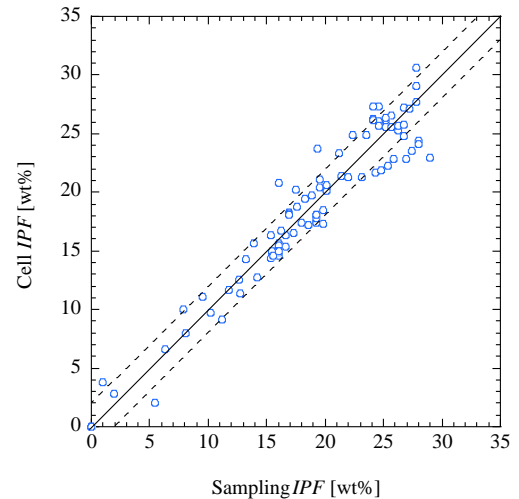


Fig. 8 Comparison of sampling  $IPF$  and cell  $IPF$

#### 5. 結言

本研究ではダイレクトスラリーアイス製氷装置において、生成されているスラリーアイスの $IPF$ をリアルタイムで測定することのできるセンシング機器の研究開発を目的とした。スラリーアイスの温度帯での塩分濃度と導電率の関係および不導体の充填率と導電率の関係を実験的に調べ、導電率と $IPF$ の関係式を導出した。 $IPF_0$ を用いるとセル方式とサンプリング方式の $IPF$ 差は $\pm 2\%$ 以内にはほぼ収まるという結果が得られた。これより、導電率を用いた $IPF$ のリアルタイム測定の有効性が得られた。

#### 文献

- (1) 渡辺悦夫, 魚介類の鮮度と加工・貯蔵, 成山堂書店, 1995.
- (2) 児玉修, “シャーベット海水氷の実力と使用方法”, 養殖, 第42巻, 5号, pp.18-21, 2005.
- (3) 野村孝一, 坂本雄司, 松本清, 笹島豊, “牛乳一強電解質溶液系の導電率に及ぼす主要固形成分の影響,” 日本食品工業学会誌, 第12巻, 31号, pp.790-794, 1984.