

攪拌による氷充填率センシングによる影響

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1190090 孫 瑞

1. 緒言

スラリーアイスとは、NaCl 水溶液中に氷粒子が混在した液状氷である。塩分濃度 1wt% 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*) が 20~30wt% のとき、スラリーアイス温度は -0.8~-0.9℃ となる。また、魚介類の凍結温度が -1℃~-2℃ であることを考慮すると、魚介類の凍結温度に極めて近い温度での保存が可能となる。本研究では $IPF \geq 25\text{wt}\%$ のスラリーアスを安定的に生成できるダイレクト型スラリーアイス生成装置の開発を行っている。本装置の課題として、ジェネレーター内で生成されたスラリーアスの *IPF* が 30wt% 以上になると流動性が低くなり、氷粒子が内部で閉塞することが挙げられる。しかし、現在はジェネレーター内の *IPF* をリアルタイムで測定する方法は確立されていない。そこで、本研究では、導電率を用いた *IPF* をリアルタイムで測定するセンシング機器の開発として、スラリーアスの流動状態が導電率に与える影響について明らかにすることを目的としている。

2. スラリーアイスにおける導電率を用いた *IPF* 測定

2.1 実験目的

現在の *IPF* 測定方法として、生成されたスラリーアスを固液分離し、溶液のみを採取するサンプリング方式を採用してきた。生成前の NaCl 水溶液の塩分濃度を $x_0[\text{wt}\%]$ 、生成後の NaCl 水溶液の塩分濃度を $x_T[\text{wt}\%]$ とすると、*IPF* は式(1)により算出できる。

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

しかし、この方法では、リアルタイムで *IPF* を把握することができない。そこで、式(2)に示す導電率と *IPF* の関係式を用いて、生成中のスラリーアスの導電率を測定することで、*IPF* の測定が可能であるかを実験的に調べた。

$$\frac{(\rho_{ice} - \rho_w)}{10^2} IPF^2 - \left\{ \rho_{ice} + \left(1 - \frac{k_0}{k}\right) (\rho_{ice} - \rho_w) - \frac{10^2 k_0 \rho_w}{k GPF_0} \right\} IPF + 10^2 \left(1 - \frac{k_0}{k}\right) \rho_{ice} = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ_{ice} は氷の密度 [kg/m^3]、 ρ_w は水の密度 [kg/m^3]、 k_0 は生成前の NaCl 水溶液 (0℃) の導電率、 k は生成中のスラリーアスの導電率、 GPF_0 はガラスビーズを用いて、不導体と導電率の関係を定量的に評価し、その結果から導電率が 0 となるときの不導体の体積割合である 52.2 [vol%] を採用している。⁽¹⁾

2.2 実験方法

図 1 に示すようにジェネレーター内にスラリーアスの流れ方向と平行にセルを取り付け、回転数 360rpm で掻き取り刃を回転させた。ジェネレーター内に NaCl 水溶液を充填した状態で攪拌を行い、その時の電流値を測定し、初期導電率 k_0 を求めた。ポンプを稼働し、スラリーアスの供給が始まる時間を 0 分として、5 分間隔でデジタルマルチメーターから電流値をサンプリング周期 30 秒で 10 回読み取り、その平均の電流値から導電率を求め、式(2)を用いて *IPF* を算出した。同時に 5 分毎にサンプリング方式でも *IPF* 測定を行った。

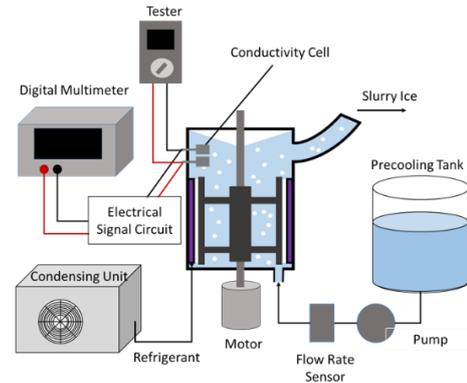


Fig.1 Slurry ice manufacturing equipment

2.3 実験結果

実験結果を図 2 に示す。本結果から、 $IPF < 15\%$ までは両方の式で *IPF* はほぼ同等の値となった。しかし、 $IPF > 15\%$ になると、セル方式はサンプリング方式よりも約 10% 低い値を示した。

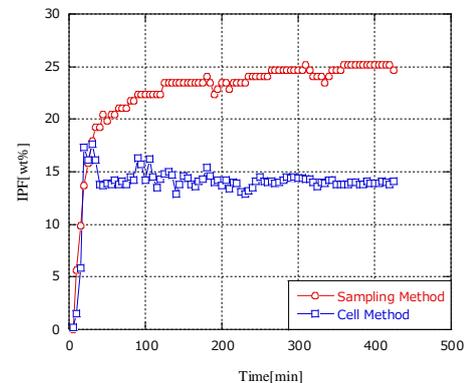


Fig.2 Experimental result

2.4 考察

本実験を用いた式(2)の *IPF* 算出式は、測定される導電率が減少することで、不導体である氷粒子が増加したことが得られる式となっている。しかし、ジェネレーター内の氷粒子の分布が不均一であれば、セル間を氷粒子が通過せず、不導体による導電率の減少を読み取ることができない。このことから、セル方式はサンプリング方式の *IPF* よりも低い値を示したと考えられる。

3. 氷粒子の分布による導電率への影響

3.1 実験目的

前項の実験結果から、ジェネレーター内の氷粒子の分布が不均一なことによりセル方式とサンプリング方式で *IPF* 約 10wt% の差が生じたと考えられる。そこで氷粒子の分布が攪拌状態に依存していると考え、攪拌状態を表す指標として用いられている攪拌レイノルズ数にて評価を試みた。本実験では、攪拌レイノルズ数を変化させることで導電率にどのような影響が出るのかを調べることを目的とした。ここで、攪拌

レイノルズ数は式(3)となる.

$$Re = \frac{\rho n D^2}{\mu} \quad (3)$$

ρ は密度[kg/m³], n は回転数[1/s], D は攪拌翼の直径 [m], μ は粘度[kg/(m·s)] である.

本式より攪拌翼の直径と回転数を変化させることで, 同じ溶液においても攪拌レイノルズ数を変えることが可能となる.

3.2 実験方法

実験装置を図3に示す. 実験中の攪拌の様子を観察するために, 容器の材質はアクリルを用いた. 容器内にスラリーアイス投入し, 氷粒子がすべて溶けるまで上部から攪拌を行った. このとき, セル方式として20秒毎に導電率を計測し, *IPF*を算出した. また, サンプリング方式として5分毎にピペットを用いて溶液を採取後, 塩分濃度を測定し*IPF*を算出した. 回転数は280, 800, 1300rpmの3つの条件で行い, それぞれの回転数で3回ずつ実験を行った. これらの攪拌レイノルズ数はダイレクト型スラリーアイス生成装置を360rpmで稼働させたときの攪拌レイノルズ数を Re_0 とおくと, それぞれ $0.19Re_0$, $0.54Re_0$, $0.89Re_0$ となっている.

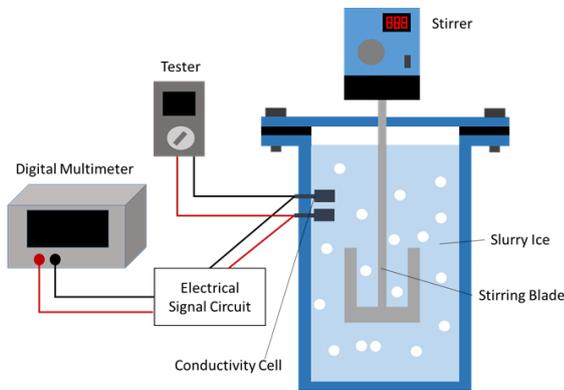


Fig. 3 Experiment device flow

3.3 実験結果

実験結果は図4~6に示す. 280rpmでは, 3回ともに $IPF \leq 15\%$ では氷粒子の凝固が見られ, セル方式とサンプリング方式で*IPF*に大きく差が出た. しかし, それ以降は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. 800, 1300rpmでは, 氷粒子の凝固は見られなかったが, 実験開始から終了まで約10~15%の差異となった. これはダイレクト型スラリーアイス生成装置で行った実験と同様の結果となっている. このことからダイレクト型スラリーアイス生成装置の攪拌状態を再現できている.

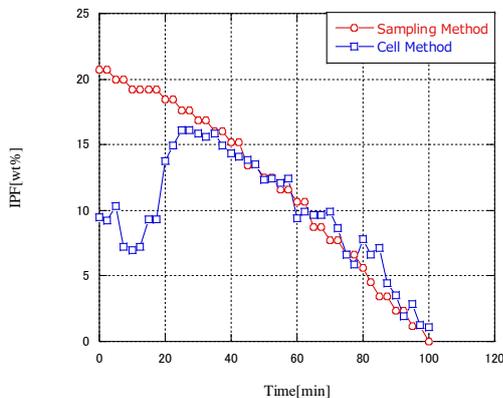


Fig.4 Experimental results at 280 rpm

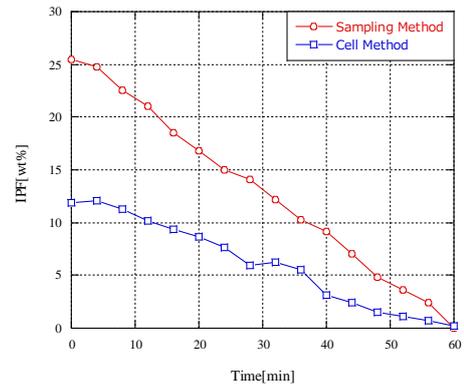


Fig.5 Experimental results at 800 rpm

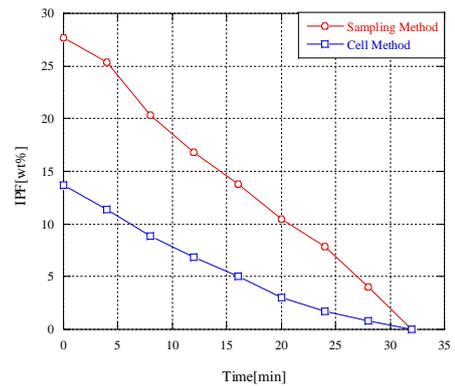


Fig.6 Experimental results at 1300 rpm

3.4 考察

280rpmから800rpmまで攪拌レイノルズ数が増加すると, セル方式とサンプリング方式で*IPF*の差が大きくなったことから, 攪拌により氷粒子の分布が変化し, 導電率にも影響を及ぼしたと考えられる. しかし, 800, 1300rpmでは同じような*IPF*の違いであり, 氷粒子の分布の偏りも目視では確認できなかったことから, 一様に攪拌はできていると考えられる. このことより, ダイレクト型スラリーアイス生成装置でも攪拌は十分であること, すなわちセル方式とサンプリング方式の差は氷粒子の分布によるものではないと考えられる. また, 280rpmでは氷粒子の凝固が見られたことから, ダイレクト型スラリーアイス生成装置でも $0.19Re_0$ で閉塞する可能性が大きくなると考えられる.

4. 結言

本研究では, ダイレクト型スラリーアイス生成装置におけるセル方式とサンプリング方式で*IPF*の違いの原因として, ジェネレーター内部の氷粒子の分布に着目し, 攪拌レイノルズ数を変化することで導電率にどのような影響を及ぼすかを実験的に検証した. その結果, *IPF*の違いの原因としてジェネレーター内部の氷粒子の分布が不均一という可能性は低く, 今後は式(2)について再検討する必要がある.

参考文献

- (1) 高野礼 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高知工科大学平成29年度卒業論文