

2019（令和元）年度 修士学位論文

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

2020年3月9日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1225033 高野礼

指導教員 松本泰典

目次

第1章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 スラリーアイスの特徴と有効性.....	1
1.1.2 ダイレクトスラリーアイス製氷装置.....	2
1.2 研究目的.....	4
1.3 先行研究.....	5
1.3.1 塩分濃度を用いた <i>IPF</i> 測定方法.....	5
1.3.2 温度を用いた <i>IPF</i> 測定方法.....	6
1.3.3 粘度を用いた <i>IPF</i> 測定方法.....	6
第2章 <i>IPF</i> 測定方法.....	8
2.1 サンプリング方式の課題.....	8
2.2 導電率を用いた <i>IPF</i> 測定方法.....	8
第3章 塩分濃度と導電率の関係.....	10
3.1 セル定数の測定.....	10
3.1.1 目的.....	10
3.1.2 実験方法.....	10
3.1.3 実験結果.....	12
3.1.4 考察.....	14
3.2 塩分濃度と導電率の関係.....	15
3.2.1 目的.....	15
3.2.2 実験方法.....	15
3.2.3 実験結果.....	17
3.2.4 考察.....	18
第4章 不導体と導電率の関係.....	20
4.1 目的.....	20
4.2 実験装置および方法.....	20
4.2.1 実験装置.....	20
4.2.2 実験方法.....	21

4.3 実験結果.....	24
4.4 考察.....	26
第5章 導電率を用いたスラリーアイスのIPF測定.....	29
5.1 GPF_0 を用いたIPF測定.....	29
5.1.1 目的.....	29
5.1.2 実験方法.....	29
5.1.3 実験結果.....	30
5.1.4 考察.....	33
5.2 IPF_0 を用いたIPF測定.....	33
5.2.1 IPF_0 の算出方法.....	33
5.2.2 目的.....	36
5.2.3 実験方法.....	36
5.2.4 実験結果.....	36
5.2.5 考察.....	42
第6章 結言.....	47

第1章 緒論

1.1 研究背景

1.1.1 スラリーアイスの特徴と有効性

スラリーアイスは、NaCl水溶液中に氷粒子が混在した液状氷であり、主に凍結濃縮や生鮮食品の鮮度保持に用いられている。スラリーアイスの温度は Table 1.1 に示すようにNaCl水溶液の初期塩分濃度と氷充填率(以下、*IPF* : *Ice Packing Factor*)により決定される。一方、魚介類の凍結温度は Table 1.2 より $-2\sim-1^{\circ}\text{C}$ に分布していることがわかる。魚の腐敗は細菌の増殖によるものであり、それを防止する方法として低温で保存することが有効な手法の一つである。低温貯蔵法は、単に微生物の作用を抑制するだけでなく、食品の性状を大きく変えることなく、ほぼ保存前と同じ状態で貯蔵することができるので、鮮魚介類およびその加工品の貯蔵に広く用いられている^[1]。しかし、凍結させてしまうと解凍時に旨味成分が流出することや、表面部分の水分が乾燥し冷凍やけを起こす可能性がある。このことから、低温かつ魚が凍結しない温度で保存することが望ましいといえる。これに対して、塩分濃度1wt%のNaCl水溶液から $IPF=20\sim30\text{wt}\%$ のスラリーアイスを作成すると、その温度は $-0.9^{\circ}\text{C}\sim-0.8^{\circ}\text{C}$ となり、低温かつ魚が凍結しない温度で魚介類の保存が可能となる。また、氷は融解するときに吸熱するが、Fig.1.1 に示すようにスラリーアイス中に混在している氷粒子は約0.2mmの粒子径と非常に微小なため、比表面積が従来の砕氷よりも大きくなり、融解が速くなるため、被冷却物から素早く熱を奪うことが可能となる。以上のことから、スラリーアイスは魚介類の温度を急速に下げ、低温かつ凍結しない温度にて保存が可能となり魚介類の鮮度保持に有効であるといえる。

Table 1.1 NaCl 水溶液の初期塩分濃度、*IPF*とスラリーアイスの温度の関係^[2]

Initial salinity [wt%]	Ice Packing Factor [wt%]					
	0	10	20	30	40	50
3.5(Seawater)	-2.2	-2.5	-2.8	-3.2	-3.7	-4.5
3.0	-1.9	-2.1	-2.4	-2.7	-3.2	-3.8
2.5	-1.6	-1.8	-2.0	-2.3	-2.6	-3.2
2.0	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-2.1	-2.5
1.5	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6	-1.9
1.0	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.1	-1.3
0	0	0	0	0	0	0

Table 1.2 魚介類の凍結温度^[1]

Fish species	Freezing temperature(°C)
Mackerel	-1
Yellowtail	-1.25
Ahi tuna	-1.25
Albacore tuna	-1.25
Horse mackerel	-1
Saury	-1.25
Whale	-1
Sea bream	-1.5
Carp	-0.75
Squid	-2.25

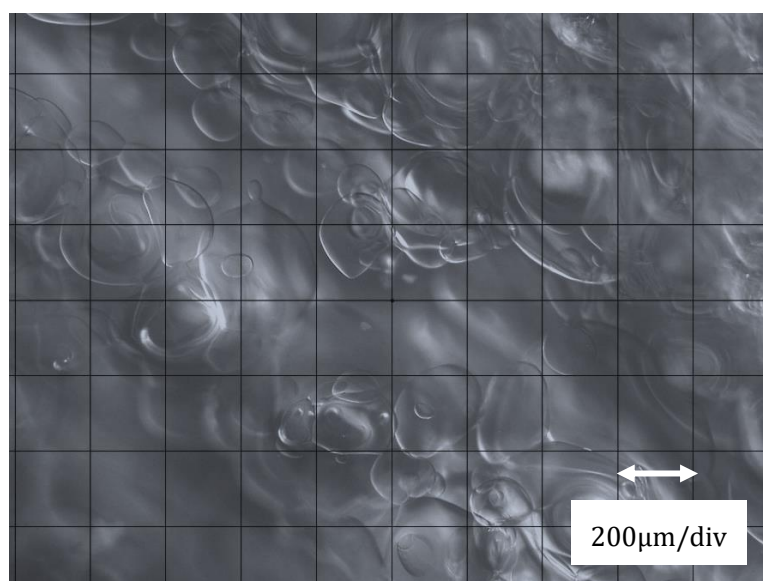


Fig. 1.1 スラリーアイスの拡大写真

1.1.2 ダイレクトスラリーアイス製氷装置

研究開発を行っているダイレクトスラリーアイス製氷装置の概要を Fig.1.2 に示す。ジェネレーターは 2 重円筒構造になっており、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。NaCl 水溶液は十分に冷却された後、内筒内壁面に氷膜を形成する。その氷膜上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、スラリーアイスを生産する。既存の製氷装置は、タンクとジェネレーター間で NaCl 水溶液を循環し、タンク内に氷粒子を徐々に増加させていく循環方式である。しかし、スラリーアイスの生成

量がタンク内に投入したNaCl水溶液の量に依存することや、Fig1.3 に示すように目的の $IPF \geq 25\text{wt}\%$ に到達するまでに長時間を要することなどが課題として挙げられていた。そこで、本装置ではタンクの容積に制限されず、 $IPF \geq 25\text{wt}\%$ のスラリーアイスを経短時間で生成し、連続的に供給することを目的としている。

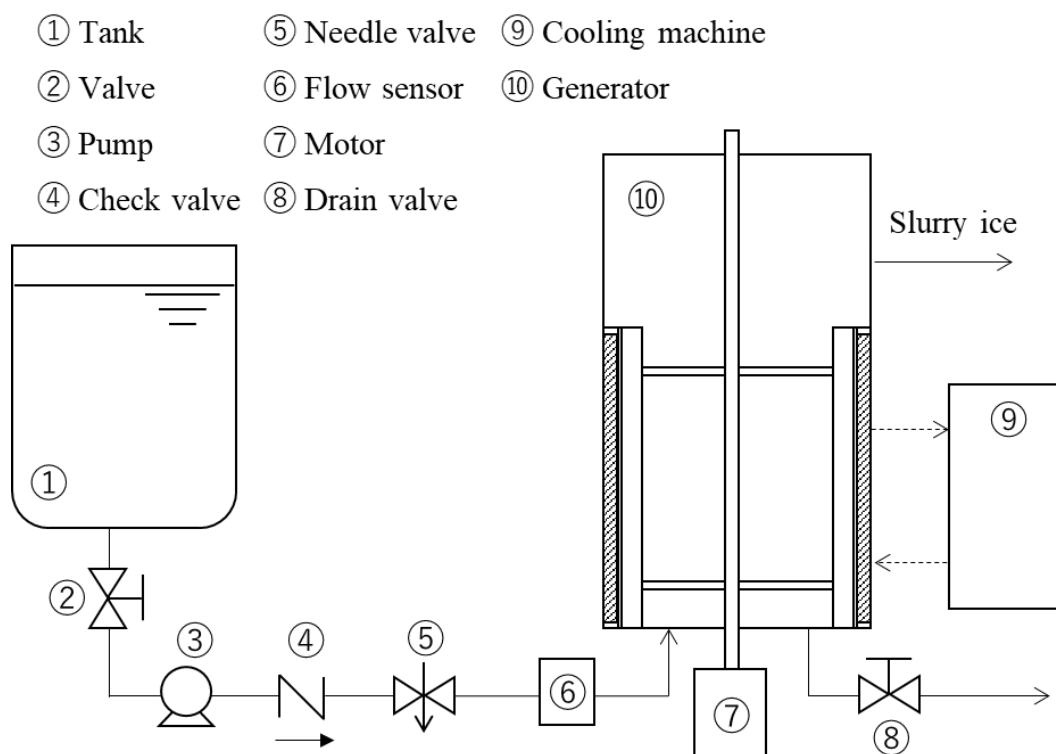


Fig. 1.2 ダイレクトスラリーアイス製氷装置の概要

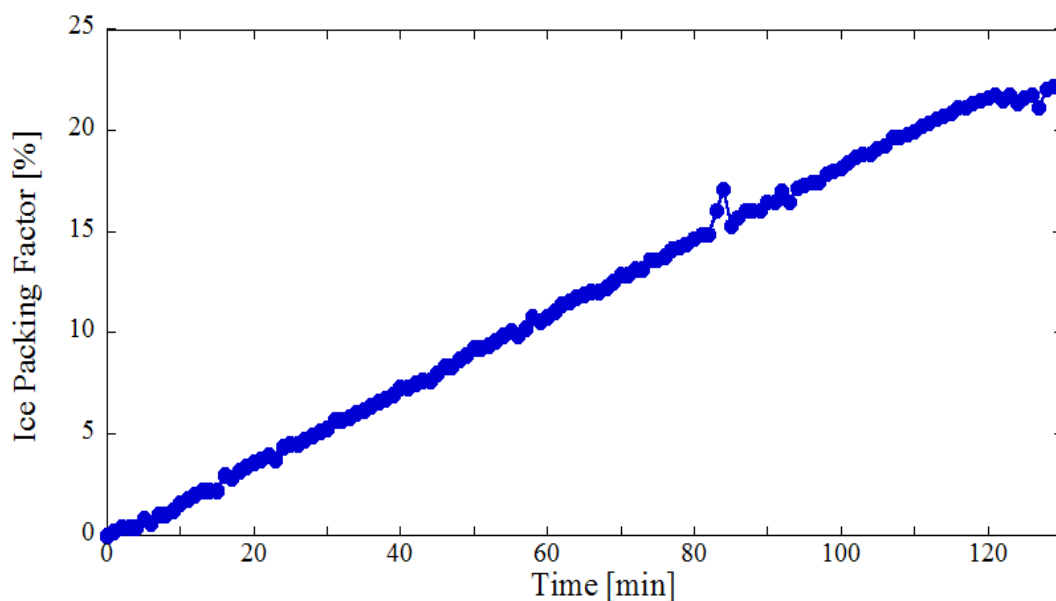


Fig. 1.3 既存のスラリーアイス製氷装置におけるタンク内の IPF の経時変化

1.2 研究目的

ダイレクトスラリーアイス製氷装置では、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* をリアルタイムで測定することが重要となる。ジェネレーター内の *IPF* が 30wt% を超えてしまう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、スラリーアイスを提供することが困難になってしまう。 $IPF = 25 \sim 30\text{wt}\%$ のスラリーアイスを実定的に供給し続けるためには、Fig.1.4 に示すようにジェネレーター内の *IPF* をリアルタイムで測定し、 *IPF* の変化に応じて NaCl 水溶液の流量を制御する必要がある。そこで、本研究では生成中のスラリーアイスの *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。

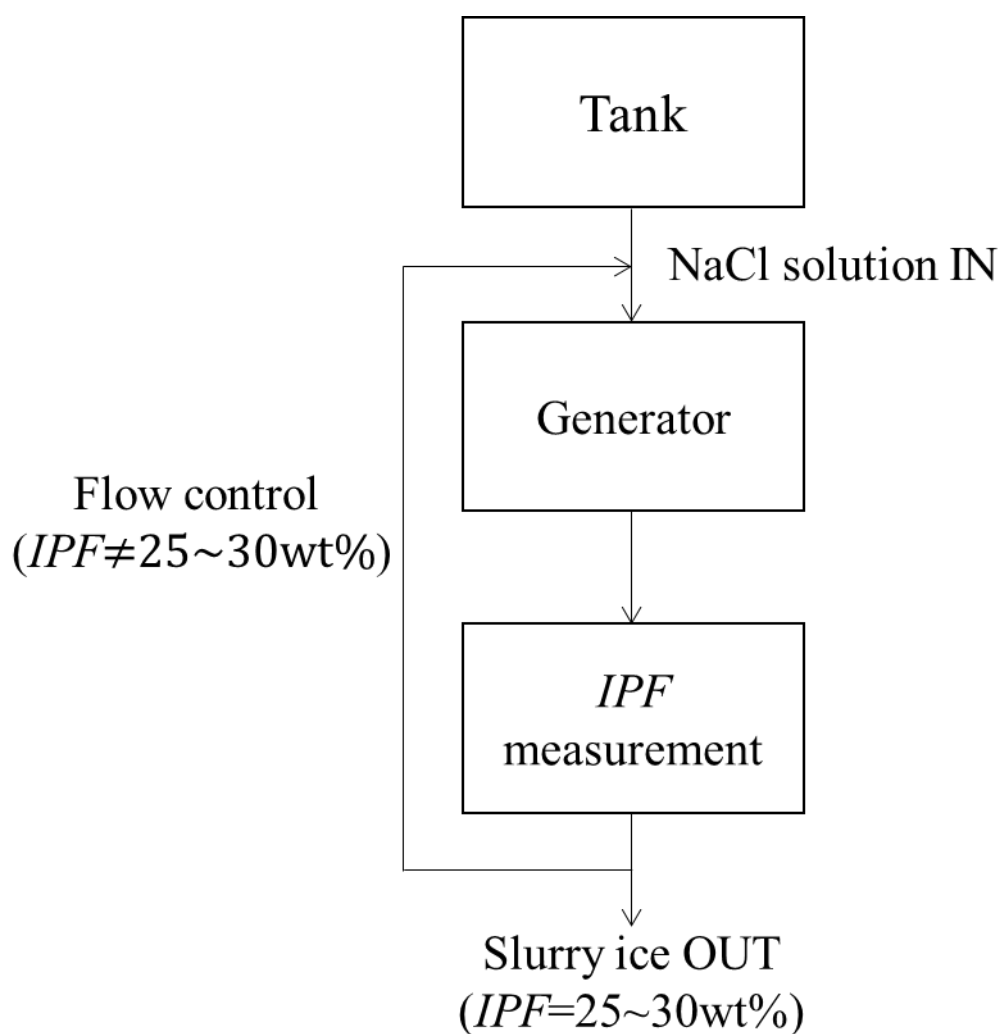


Fig. 1.4 *IPF* センシング機器によるフィードバック制御

1.3 先行研究

1.3.1 塩分濃度を用いたIPF測定方法

タンク内に製氷を行うために投入したNaCl水溶液の塩分濃度(以下, 初期塩分濃度) x_0 [wt%]は, 水溶液中のNaClの質量 a_0 [kg], 水の質量 m_0 [kg]から,

$$x_0 = \frac{100a_0}{m_0 + a_0} \quad (1.1)$$

と表される. ここで m_0 について展開すると,

$$m_0 = \frac{100a_0}{x_0} - a_0 \quad (1.2)$$

となる. また, 製氷から T 時間後の水溶液の塩分濃度 x_T [wt%]は, 水溶液中のNaClの質量 a_T [kg], 水の質量 m_T [kg]とすると,

$$x_T = \frac{100a_T}{m_T + a_T} \quad (1.3)$$

で表される. ここで m_T について展開すると,

$$m_T = \frac{100a_T}{x_T} - a_T \quad (1.4)$$

となる. スラリーアイス中の氷粒子は純水であり, 水溶液中に溶解しているNaClの質量は変化しないので,

$$a_0 = a_T \quad (1.5)$$

という関係である. 製氷後の氷粒子の質量を m_{ice} [kg]としたとき, 水の質量 m_T [kg]は,

$$m_T = m_0 - m_{ice} \quad (1.6)$$

で表される. ここで製氷後のIPF[wt%]は, 溶液全体の氷粒子の割合なので,

$$IPF[\text{wt}\%] = \frac{100m_{ice}}{m_T + a_T + m_{ice}} \quad (1.7)$$

となる. 式(1.7)は式(1.5), (1.6)を用いると,

$$IPF[\text{wt}\%] = \frac{100m_{ice}}{m_0 + a_0} \quad (1.8)$$

となる. また, 式(1.2), (1.4), (1.5), (1.6)より氷粒子の質量は,

$$m_{ice} = \frac{100a_0}{x_0} \left(1 - \frac{x_0}{x_T}\right) \quad (1.9)$$

である. 従って, 式(1.1), (1.8), (1.9)より,

$$IPF[\text{wt}\%] = 100 \left(1 - \frac{x_0}{x_T}\right) \quad (1.10)$$

となり, IPF [wt%]は初期塩分濃度と製氷後の塩分濃度から求めることが可能となる.

1.3.2 温度を用いたIPF測定方法

スラリーアイス中の氷粒子は溶媒である水から生成される。従って、*IPF*が増加するとNaCl水溶液の塩分濃度が上昇し凝固点降下が促進される。この凝固点降下を計測することで、塩分濃度の値を求め、式(1.10)より*IPF*を測定する方法が考えられる。ここで、スラリーアイスの塩分濃度と凝固点の関係は、凝固点降下を ΔT [°C]、溶媒の濃度を x [%]、キルヒホフ係数を i (NaCl : 2)、凝固点降下係数を K_f (水:1.86)、溶質の分子量を M (NaCl:58.44)とおくと、

$$\Delta T = -iK_f \frac{x}{10^2 - x} \frac{10^3}{M} \quad (1.11)$$

のように表すことができる。

本研究のスラリーアイスで考えられる塩分濃度範囲 1.00~1.43wt%では、塩分濃度が 0.01wt%変化する毎に温度は約 0.0065°C変化することがわかる。しかし測温抵抗体は Pt100 において最も精度の高いクラス AA で、許容差は JIS C 1604 より $\pm 0.1^\circ\text{C} + 0.0017|t|$ (t は温度の絶対値[°C])となっており、スラリーアイスの温度帯において許容差は約 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ である。このことから測定できる温度の精度に対して、スラリーアイスにおける塩分濃度の変化は小さく、凝固点降下から*IPF*測定を行うことは不可能であると考えられる^[3]。

1.3.3 粘度を用いたIPF測定方法

スラリーアイスは*IPF*が上昇すると粘度が増加し、掻き取り刃を回転させるために必要なトルクが大きくなる。従って、掻き取りトルクの変化より*IPF*を測定する方法が考えられる。ここで、掻き取りを行う際のモーターの出力 P_1 [W]は、掻き取り刃の回転数を N [min⁻¹]、トルクを T [N]とすると、

$$P_1 = 2\pi \frac{N}{60} T \quad (1.12)$$

で表される。三相交流モーターに入力される電力 P_2 [W]は、電圧を E [V]、電流を I [A]、電流と電圧の力率を ϕ 、モーターの効率を η とすると

$$P_2 = \sqrt{3}EI\eta\cos\phi \quad (1.13)$$

となる。ここで入力される電力と出力は $P_1 = P_2$ で、掻き取りトルクは、

$$T = \frac{2\pi\sqrt{3}}{60N} EI\eta\cos\phi \quad (1.14)$$

から求めることができる。電圧値と位相差、効率は一定であるため、掻き取りトルクは電流値と比例関係であることがわかる。Fig1.5 にダイレクトスラリーアイス製氷装置でスラリーアイスの生成を行ったときの*IPF*と電流値の経時変化を示す。この結果より、モーターの電流値は生成開始から 60 分後まではほとんど変化が見られず一定の値を示している。この実験結果より、掻き取りトルクの値から*IPF*を求めることは困難といえる。従って、スラリーアイスの粘度変化により生じる掻き取りトルクの変化を用いた*IPF*測定は不

可能である [3].

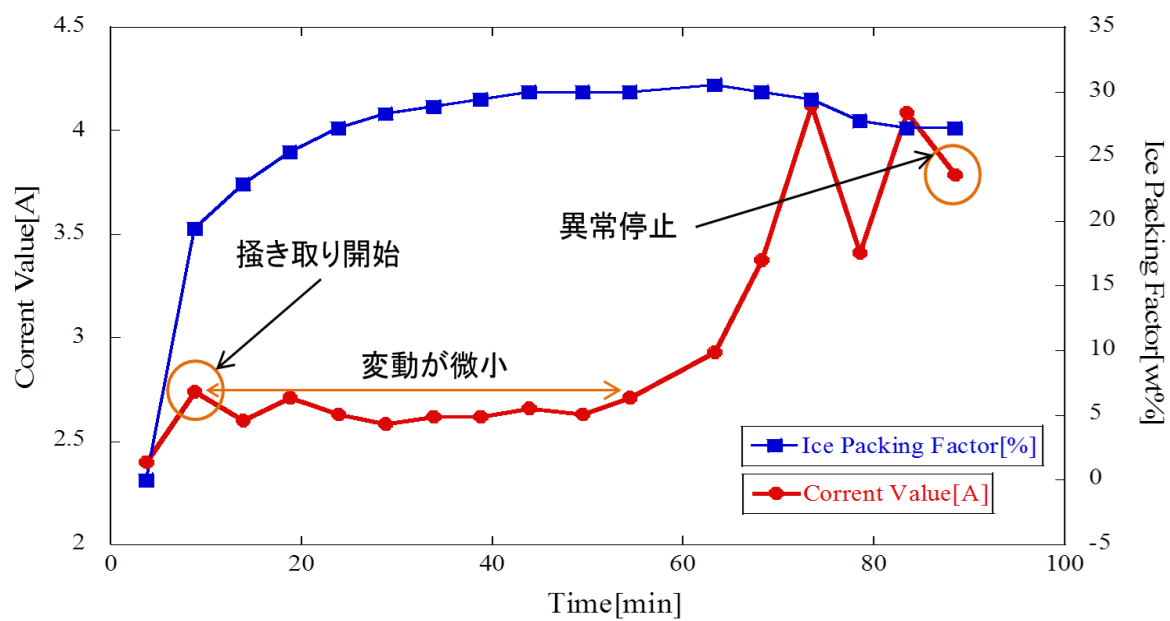


Fig. 1.5 製氷開始からのモーター電流とIPFの経時変化

第2章 IPF測定方法

2.1 サンプルング方式の課題

主に用いられているIPF測定方法は、サンプルング方式である。Fig.2.1 に示すように生成されたスラリーアイスを用いて漏斗とフィルターを用いて固液分離を行い、溶液のみを試験管に採取する。その後、溶液の温度を常温になるまで上昇させ、塩分濃度計を用いて濃度を測定することでIPFを算出している。溶液の温度を常温まで上昇させる必要があるのは、塩分濃度計の規格により測定可能な溶液温度が5.0~100°Cの範囲のためである。また、本研究では溶液温度と雰囲気温度に差がある場合、測定中に溶液温度が変化してしまい計測器の温度補償による濃度表示に影響し、正確に測定が出来ない可能性があるため、常温に戻してから塩分濃度を測定している。この方法ではIPFを測定するために、固液分離および温度上昇の2つの過程が必要なことから大きなタイムラグが生じ、ジェネレーター内のIPFをリアルタイムで測定することが不可能である。

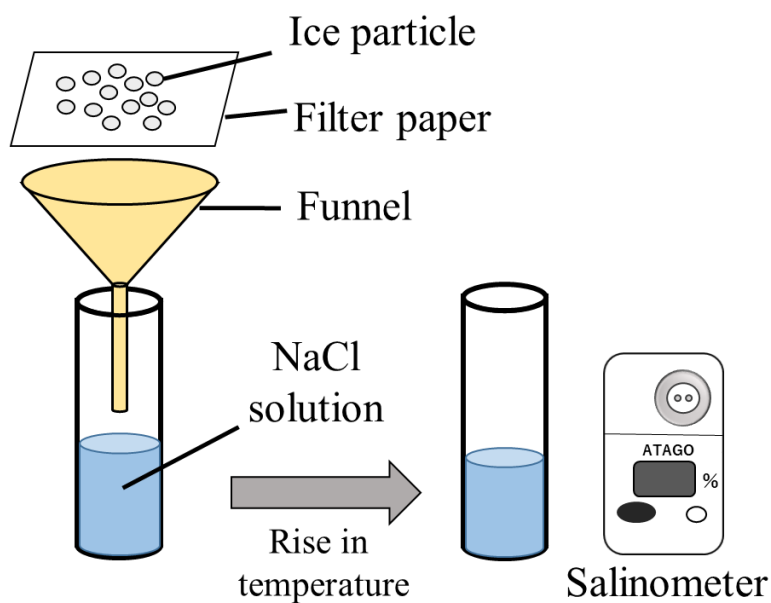


Fig. 2.1 サンプルング方式

2.2 導電率を用いたIPF測定方法

導電率とは電気の流れ易さを表す指標であり、電圧 E [V]、電流 I [A]、抵抗 R [Ω]は式(2.1)のオームの法則に従う。

$$E = IR \quad (2.1)$$

ここで、 R は式(2.2)に示すように導体の長さ l [cm]に比例し、断面積 A [cm^2]に反比例する。

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.2)$$

ρ は抵抗率[$\Omega \cdot \text{cm}$]であり、断面積が 1cm^2 で長さ 1cm の導体の抵抗に比例する定数である。抵抗率の逆数が導電率 $k[\text{S}/\text{cm}]$ であり、

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

のように表される。ここで l/A はセル定数 $J[\text{cm}^{-1}]$ となり、

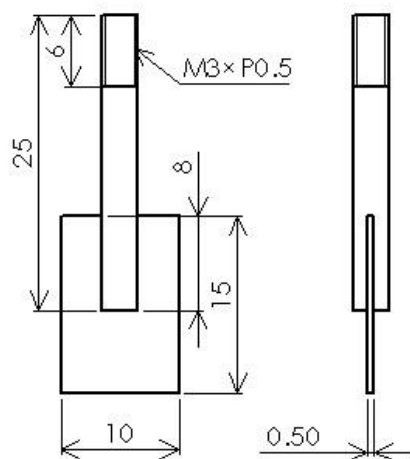
$$J = \frac{l}{A} \quad (2.4)$$

のように電極面積と距離により決定される^[4]。式(2.1), (2.3), (2.4)より導電率は、

$$k = \frac{I}{E} \cdot J \quad (2.5)$$

から求められる。

導電率の測定方式として、交流2電極方式、交流4電極方式、電磁誘導方式の3種類が挙げられる。本研究では、最も構造が簡易であり、比較的取り付けも容易な交流2電極方式に着目した。また、導電率を用いた IPF 測定(以下、セル方式)は、ジェネレーター内に2枚の電極(以下、セル)を取り付け、生成中のスラリーアイスの導電率を計測し、 IPF に変換するという方式である。セル方式で IPF を測定することにより、サンプリング方式での固液分離及び温度上昇の2つの過程を経る必要がないため、 IPF に合わせた流量制御が可能となり、 $IPF = 25 \sim 30\text{wt}\%$ のスラリーアイスを安定的に供給することができる。ここで、セルは剛性、耐腐食性を考慮し Fig.2.2 に示すプラチナメッキチタン電極を使用した。セルの大きさは縦15mm、横10mm、厚さ0.5mm、取り付け部にはM3の雄ねじを切っている。



(a) 寸法(mm)



(b) 外観

Fig. 2.2 セル

第3章 塩分濃度と導電率の関係

3.1 セル定数の測定

3.1.1 目的

導電率を測定するにあたって、使用するセルのセル定数 J を得ることは必要不可欠である。セル定数は理論的に求めることは可能であるが、実際には電極面積や距離にバラつきがあり、理論値とは異なる値となってしまう。そこで、本実験では 25°Cにおいて濃度と導電率の関係が既知であるNaCl水溶液を用いてセル定数の算出を行うことを目的とした。NaCl水溶液の濃度と導電率の関係を Table 3.1 に示す。

Table 3.1 塩分濃度と導電率の関係(25°C) [5]

Salinity [w/v%]	Conductivity [S/m]
0.001	0.00214
0.003	0.0064
0.005	0.0106
0.01	0.0210
0.03	0.0617
0.05	0.103
0.1	0.199
0.3	0.569
0.5	0.948
1.0	1.76
3.0	4.86
5.0	8.10
10	14.0

3.1.2 実験方法

実験装置の概要を Fig.3.1, 導電率測定の概要を Fig.3.2 に示す。ビーカーに蒸留水を溶媒としたNaCl水溶液を生成する、これを溶液温度が 25°Cとなるように、恒温水槽(AS ONE, サーマックス(ウォーターバス), TM-1)を用いて加温を行った。その後、セルを用いて溶液の電流値を測定した。なお、電流値の測定を行うにあたり、溶液の濃度が一樣となるように攪拌機(IKA, 電子制御攪拌機, EUROSTAR 20 digital)を用いて攪拌を行った。塩分濃度は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0wt%, 攪拌は 180, 360min⁻¹, セル間の距離は 15, 30mm の条件でそれぞれ 3 回ずつ実験を行い、セル定数を算出した。電流, 電圧値の測定は, オシロスコープに接続した電流プローブ, 電圧プローブで行った。交流波形の入力, 電流増幅回路の直流電源, 電流, 電圧測定に用いた機器を Table 3.2 に示す。

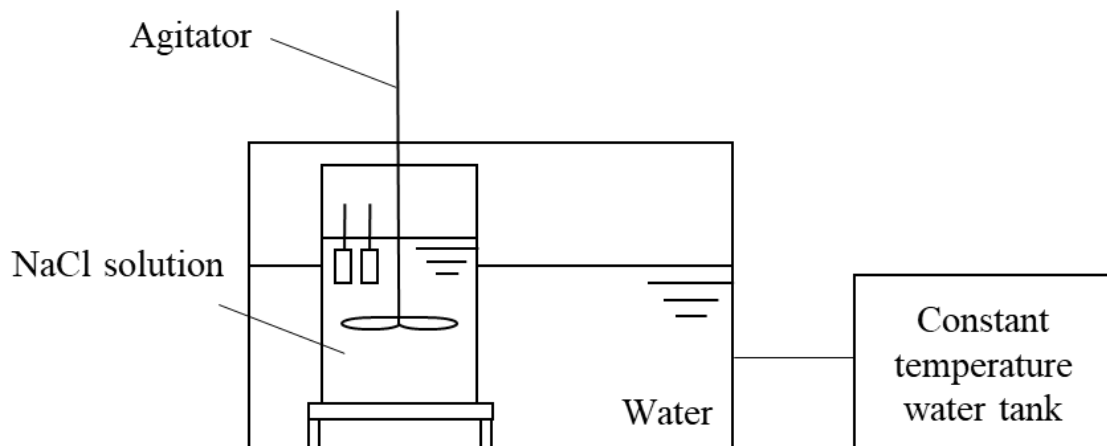


Fig. 3.1 実験装置の概要

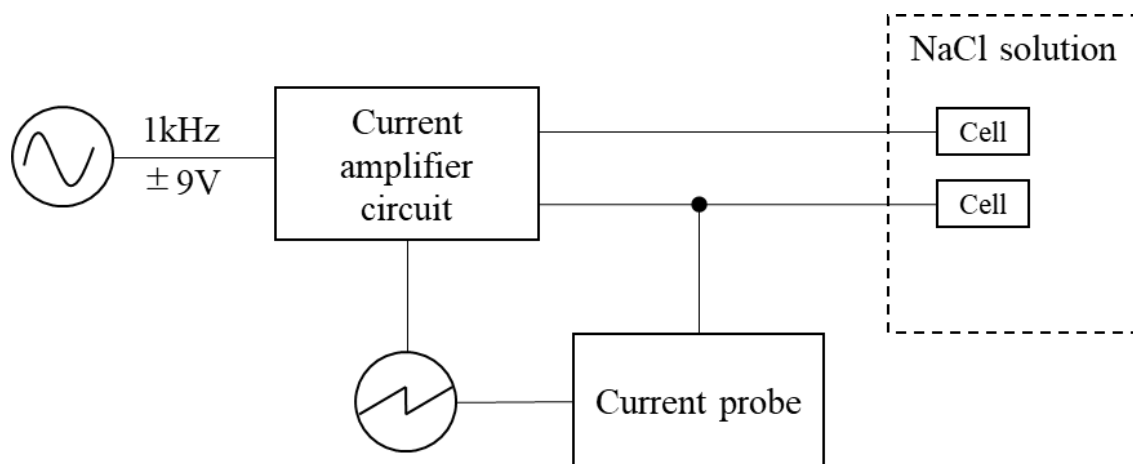


Fig. 3.2 導電率測定の概要

Table 3.2 使用機器

Equipment	Model number
Oscilloscope	BK PRECISION 2553
Voltage probe	BK PRECISION PR150B
Function generator	TEXIO FG-274
DC power supply	TEXIO PW18-1.3ATS
Current probe	HIOKI CT6700
Current probe power supply	HIOKI 3272

3.1.3 実験結果

実験から得られたセル定数を Fig.3.3~3.6, セル定数の平均値および標準偏差を Table 3.3 に示す. セル定数は濃度によらず一定の値を示すことが理想であるが, 何れの実験条件でもセル定数にはバラつきが生じるという結果となった. ここで条件毎に標準偏差を用いて比較すると, セル間の距離については 15mm の方がセル定数のバラつきは小さく, 攪拌速度については 180, 360 min^{-1} でバラつきの幅にほとんど差は見られなかった.

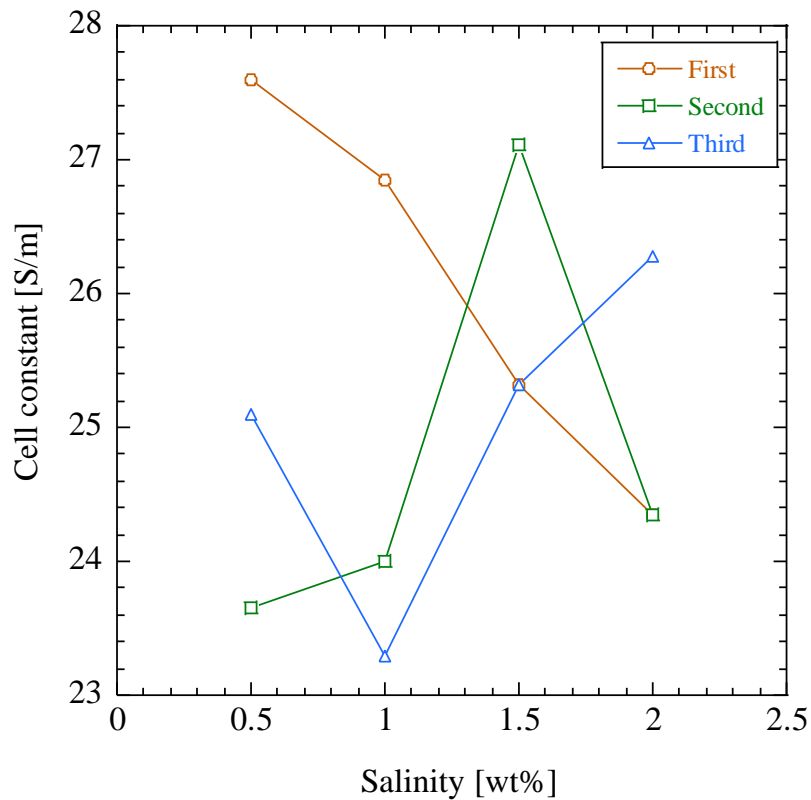


Fig. 3.3 実験結果(セル間の距離 15mm, 攪拌速度 180 min^{-1})

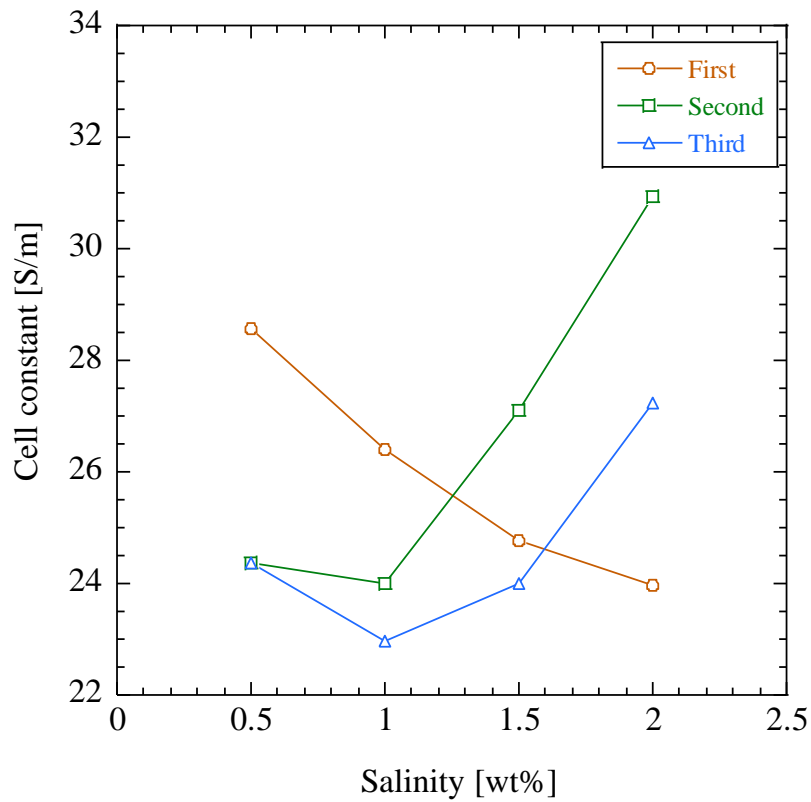


Fig. 3.4 実験結果(セル間の距離 15mm, 攪拌速度 360min^{-1})

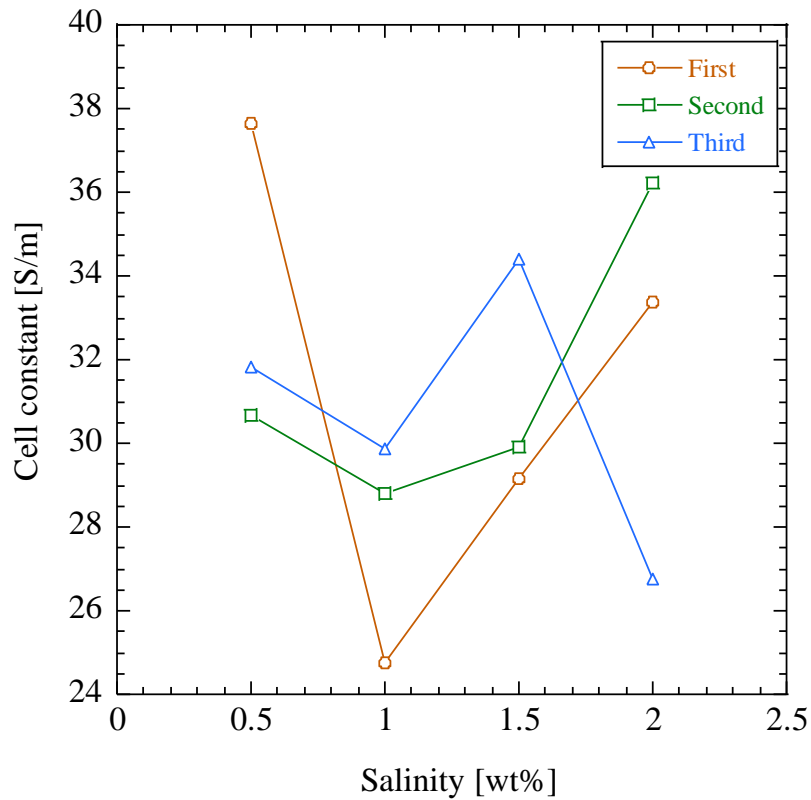


Fig. 3.5 実験結果(セル間の距離 30mm, 攪拌速度 180min^{-1})

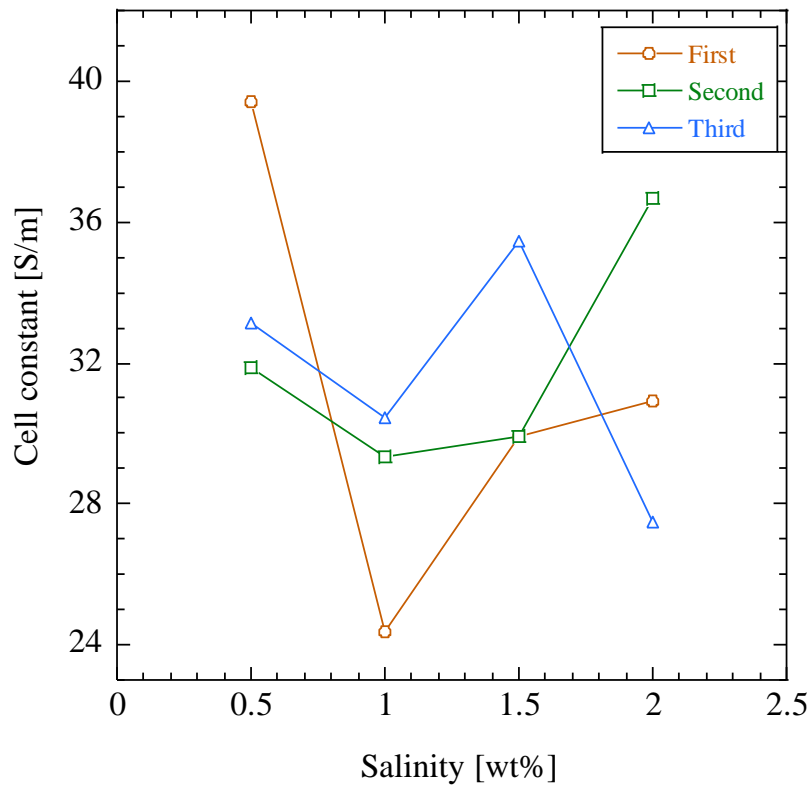


Fig. 3.6 実験結果(セル間の距離 30mm, 攪拌速度 360min⁻¹)

Table 3.3 各条件でのセル定数の平均値および標準偏差

	15mm		30mm	
	180min ⁻¹	360min ⁻¹	180min ⁻¹	360min ⁻¹
Average	25.27	25.15	31.11	31.58
Standard deviation	1.360	1.650	3.614	3.934

3.1.4 考察

セル間の距離が大きくなれば抵抗も増加し、電流値は減少してしまう。電気回路には少なからずノイズが存在し、測定する電流値が小さくなるほどそのノイズの影響を受けやすくなる。そのため、セル間の距離 15mm よりも 30mm の方がセル定数のバラつき幅が大きくなったと考えられる。また、攪拌速度については 180, 360min⁻¹でほとんど差が見られなかったことから、180min⁻¹でも十分に攪拌が行えていると考えられる。攪拌速度が過剰になると溶液内に気泡が発生し、導電率に影響を与えてしまうため、攪拌速度はより遅いほうが望ましい。またセル定数 J の理論値は、セル間の距離 15mm で $J=100\text{m}^{-1}$ 、30mm で $J=200\text{m}^{-1}$ となり、理論値と測定値では大きく異なることがわかる。従って、導電率のセル定数は、電

極面積や距離から理論的に求めるのではなく、導電率が既知のNaCl水溶液を用いて実験的に値を得る必要があるといえる。

3.2 塩分濃度と導電率の関係

3.2.1 目的

25°CのNaCl水溶液における塩分濃度と導電率の関係は Fig.3.7 に示すように、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、スラリーアイスの温度は 0°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°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。

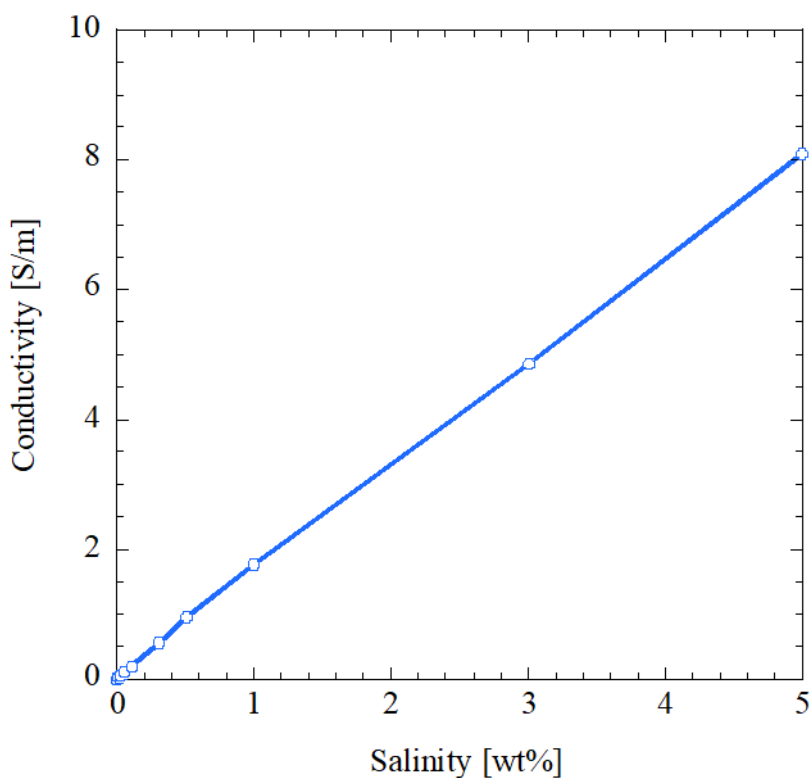


Fig. 3.7 塩分濃度と導電率の関係(25°C)^[5]

3.2.2 実験方法

実験装置の概要を Fig.3.8, 導電率測定の概要を Fig.3.9 に示す。蒸留水を溶媒としたNaCl水溶液(塩分濃度 0.5~4.5wt%の範囲で 0.5wt%間隔)をビーカーに入れ、溶液温度を -2~2°Cの範囲で 1°C間隔に温度が変化できるように、低温恒温水槽(AS ONE, ユニットクーラサーモ, UCT-1000)を用いて冷却を行った。このときのチラー水は 0°C以下でも凍結しないようにエタノールとした。セルを溶液に浸漬させ、デジタルマルチメーター(GW Instek,GDM-

8341)で電流値の測定を行った。なお、電流測定を行うにあたって、セルへの印加電圧が $\pm 5V$ となっていることをテスター(三和電気計器, デジタルマルチメーター, PC5000)により確認し、溶液の濃度が一樣となるように 3.1.2 項と同様の攪拌機で攪拌を行った。本実験を行う前に Fig.3.10 に示すように、セルの根本部分に絶縁・耐熱のポリイミドテープを巻き、水溶液への浸漬状態を均一にすることでセル定数のブレを防いだ。また、 $25^{\circ}C$ で塩分濃度 1wt% のNaCl水溶液を用いてセル定数を測定し、その結果から本実験ではセル定数 28.2/m を用いた。なお、交流波形の入力および電流増幅回路の直流電源には 3.1.2 項と同様の機器を用いた。

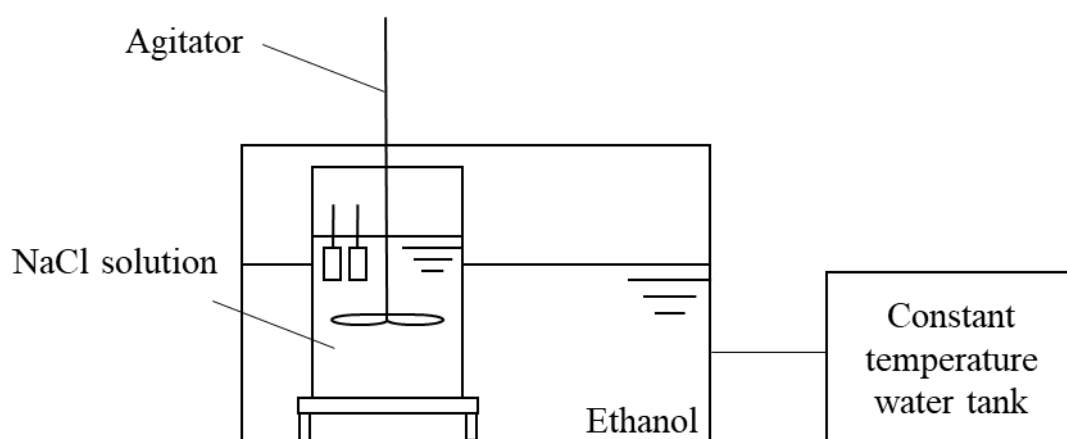


Fig. 3.8 実験装置の概要

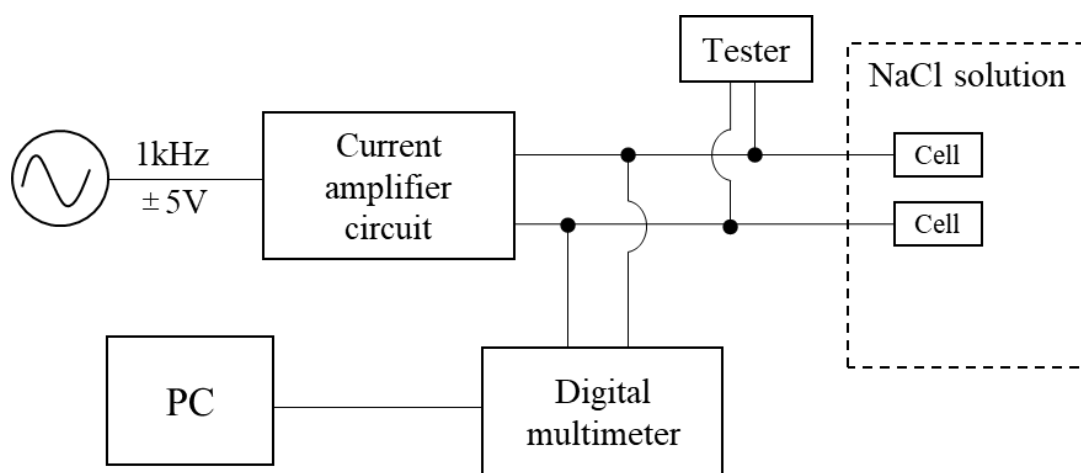


Fig. 3.9 導電率測定の概要

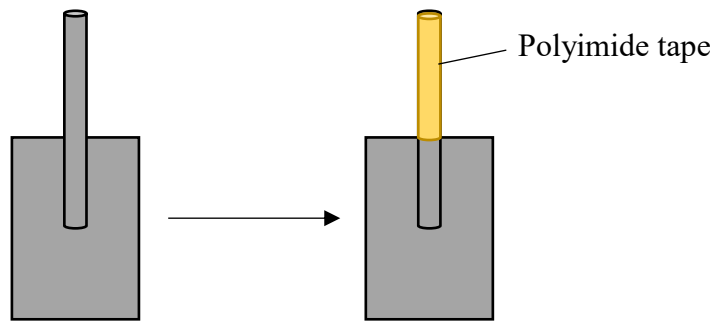


Fig. 3.10 ポリイミドテープを巻いたセル

3.2.3 実験結果

温度と導電率の関係を Fig.3.11, 塩分濃度と導電率の関係を 3.12 に示す. 本結果より, 温度と導電率については温度上昇に伴って導電率が線形的に増加する傾向が得られた. 濃度が低いほど温度上昇による導電率の増加は小さくなっており, スラリーアイス塩分濃度 1.0wt%から生成され温度は $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$ で保たれるため, この範囲での温度による導電率の変化は小さいことがわかる.

塩分濃度と導電率についても濃度増加に伴い導電率は線形的に増加しており, 25°C の場合と同様の関係を示した. また, 温度が高いほど塩分濃度増加による導電率の増加の勾配が大きくなっていることがわかる.

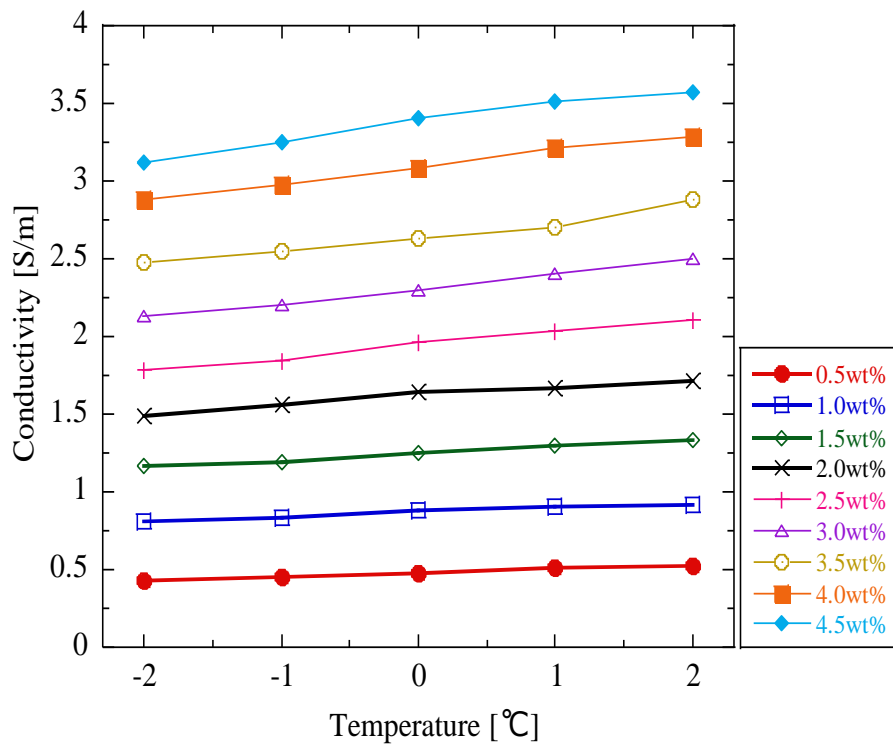


Fig. 3.11 温度と導電率の関係

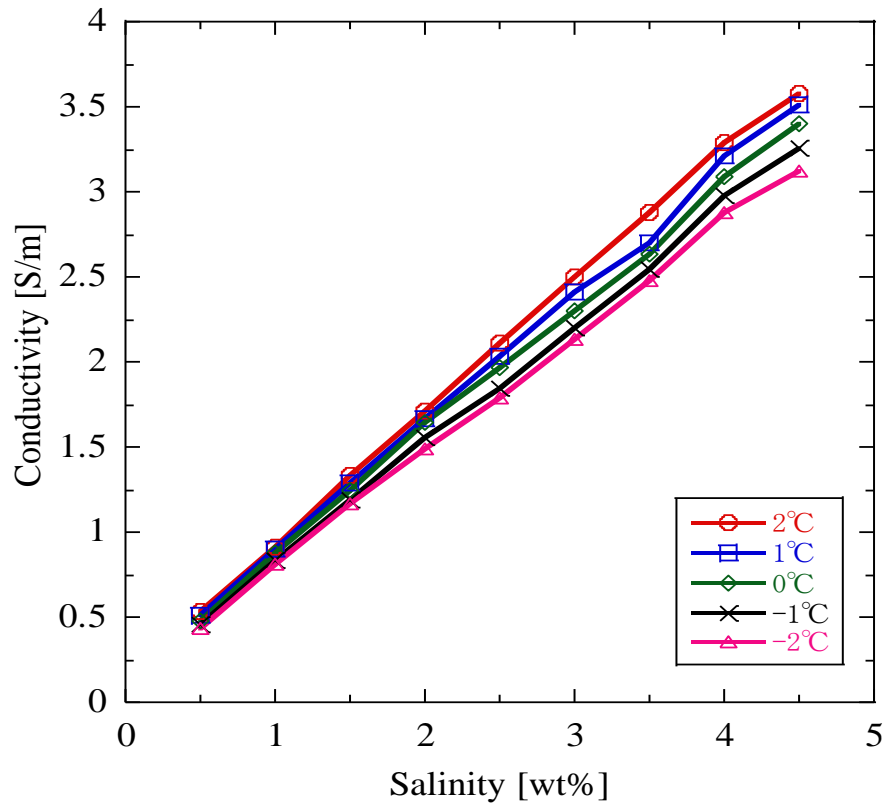


Fig. 3.12 塩分濃度と導電率の関係

3.2.4 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、勾配を a とすると、

$$k = ax \quad (3.1)$$

とおくことができる。各温度での勾配 a を Table 3.4 に示す。これより、温度が 1°C 上昇すると導電率は約 4%増加し、塩分濃度が $0.1\text{wt}\%$ 増加すると、導電率は約 9%増加することがわかる。塩分濃度 $1.0\text{wt}\%$ のNaCl水溶液からスラリーアイスを生じた場合、 $IPF = 0\sim 30\text{wt}\%$ の範囲においての温度変化は Table 1.1 より 0.3°C であり、温度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 $0.42\text{wt}\%$ 変化するため、塩分濃度による導電率の変化は 30%以上となる。このことより、スラリーアイスの IPF 測定において温度変化による導電率の変化は無視できるものとし、式(3.1)の関係が成り立つ。

Table 3.4 各温度での勾配 a

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

第4章 不導体と導電率の関係

4.1 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、本研究の IPF 範囲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、氷粒子は温度によって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。そこで本実験では、氷粒子の代わりに不導体かつ雰囲気下でも相変化しない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。

4.2 実験装置および方法

4.2.1 実験装置

実験装置の断面および寸法を Fig.4.1 に示す。本装置は2重円筒構造になっており、円筒間に冷媒を供給し内筒内の溶液を冷却する。セルはケーブルグランド(タカチ電気工業, AG型ケーブルグランド高防水タイプ, AG8-3.5B)を用いて側面の $\phi 10$ の穴に取り付け、セルからの水漏れを防止した。なお、セル間の距離は15mmとした。本装置の容積は約 1080cm^3 であり攪拌翼の体積を考慮し、溶液の投入量は $1000\text{cm}^3 (= 1\text{L})$ とした。本実験では Fig.4.2 に示すように片面が平面となっているセルを用いた。

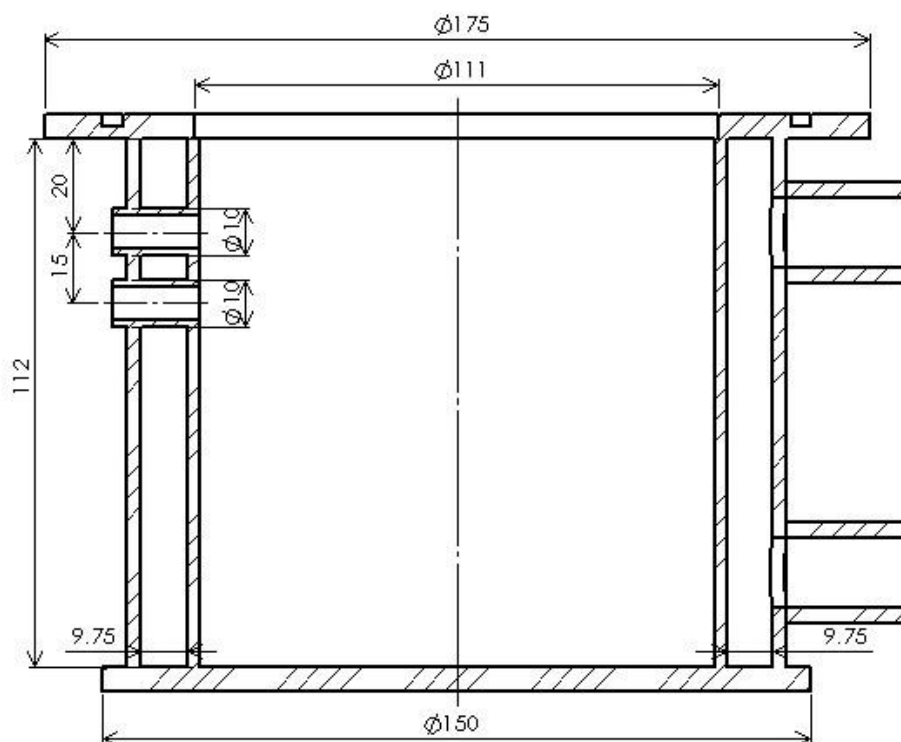


Fig. 4.1 実験装置の断面図(寸法 : mm)

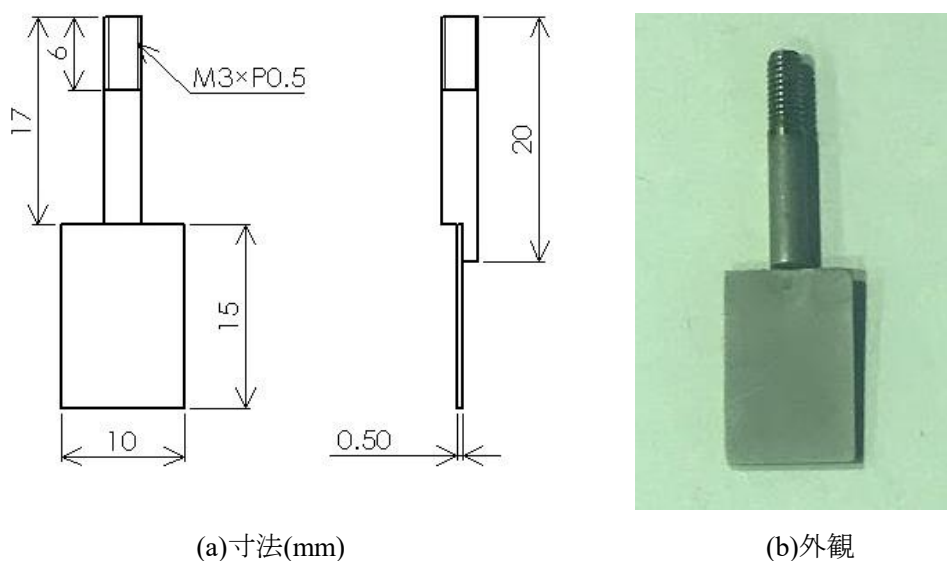


Fig. 4.2 セル

4.2.2 実験方法

実験装置の概要を Fig.4.3, 導電率測定の概要を Fig.4.4 に示す. 蒸留水を溶媒としたNaCl 水溶液(塩分濃度 1.0, 1.3, 1.5wt%)の溶液温度を 0~2°Cの範囲において 1°C間隔で変化できるチラー(ヤマト科学, 外部密閉系冷却水循環装置ネオクールサーキュレーター, CF301)を用いて冷却を行った. このときチラー水は濃度を 60vol%に調整したエチレングリコール(LLC(クーラント・不凍液)JIS 規格品)を用いた. 装置内部に平行に取り付けたセルに電圧を印加し, 3.2.2 項と同様のデジタルマルチメーターによりセル間の電圧, 電流の測定を行った. これらの測定を行うにあたって, 濃度およびガラスビーズが一樣に溶液内で分散するように攪拌機(IKA, 電子制御攪拌機, EUROSTAR 40 dijital)および攪拌翼(柴田科学, トルネード用攪拌羽根, FUT-100)を用いて攪拌速度 1000min^{-1} で攪拌を行った. また, ガラスビーズは Table 4.1 に示すように中心粒径の異なる 3 種類のものを使用した. なお, 交流波形の発生および電流増幅回路の動作電源には 3.1.2 項と同様の機器を用いた.

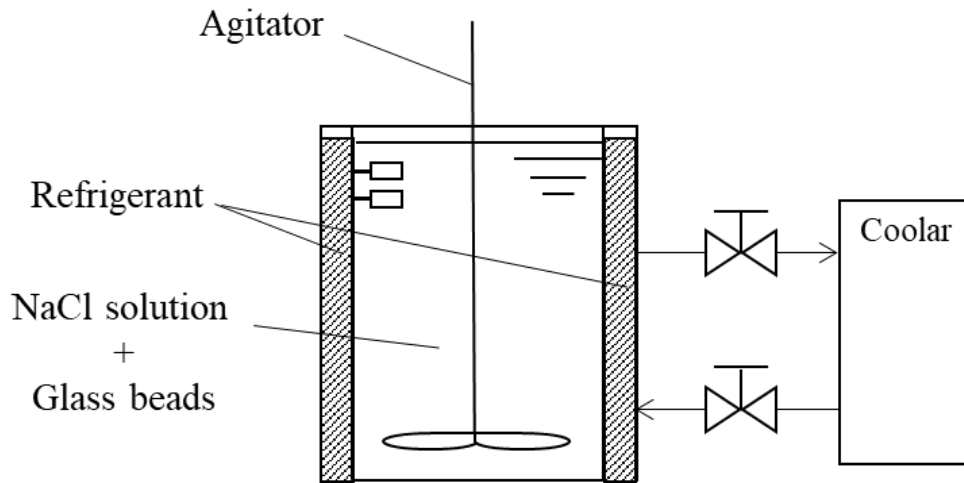


Fig. 4.3 実験装置の概要

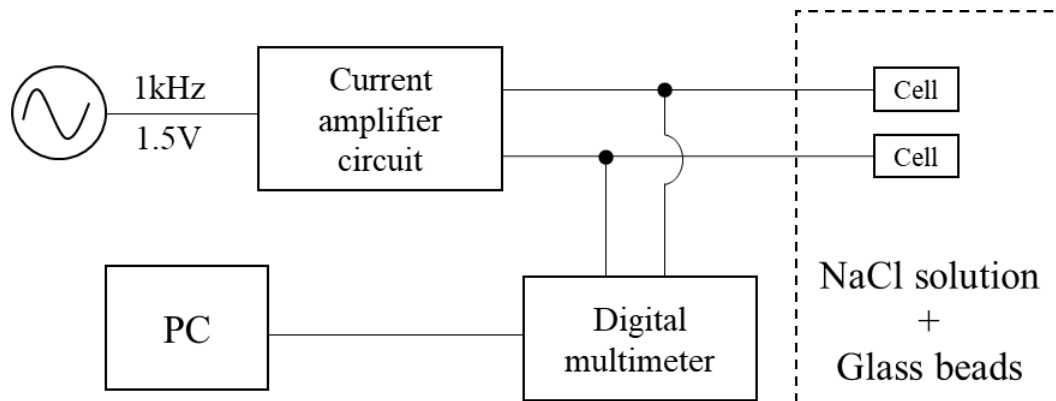


Fig. 4.4 導電率測定の概要

Table 4.1 ガラスビーズの詳細

Model number	Central particle diameter [μm]
ASGB320	38~53
ASGB60	250~355
FGB20	710~1000

ここで、スラリーアイス全体の質量 $Z_m[\text{kg}]$, $IPF = x[\text{wt}\%]$ とすると、氷の質量 $m_{ice}[\text{kg}]$ は、

$$m_{ice} = Z_m \cdot x \quad (4.1)$$

となる。スラリーアイス中の水の質量 $m_w[\text{kg}]$ は、

$$m_w = Z_m - m_{ice} \quad (4.2)$$

である。水の密度 $\rho_w[\text{kg}/\text{cm}^3]$, 氷の密度 $\rho_{ice}[\text{kg}/\text{cm}^3]$ とすると、 $IPF[\text{vol}\%]$ は、

$$IPF[\text{vol}\%] = \frac{100 \frac{m_{ice}}{\rho_{ice}}}{\frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_{ice}}{\rho_{ice}}} \quad (4.3)$$

のように表すことができる。一方、ガラスビーズの充填率(以下、*GPF* : *Glass Packing Factor*)[vol%]は、容器内に投入する溶液全体の体積を $Z_V[\text{cm}^3]$ 、ガラスビーズの体積を $V_{glass}[\text{cm}^3]$ とすると

$$GPF[\text{vol}\%] = \frac{100V_{glass}}{Z_V} \quad (4.4)$$

となる。ここで、氷とガラスビーズでは密度が異なるため本実験では体積割合が等しくなるようにガラスビーズの投入量を決定した。これにより、 $IPF[\text{vol}\%] = GPF[\text{vol}\%]$ の関係が成り立つ。このことから、式(4.4)は、

$$V_{glass} = \frac{Z_V \cdot IPF[\text{vol}\%]}{100} \quad (4.5)$$

と表すことができる。また、容器内に投入する水の体積 $V_w[\text{cm}^3]$ は、

$$V_w = Z_V - V_{glass} \quad (4.6)$$

となる。従って、投入するガラスビーズの質量割合*GPF*[wt%]は、

$$GPF[\text{wt}\%] = \frac{100 \frac{V_{glass}}{\rho_{glass}}}{\frac{V_w}{\rho_w} + \frac{V_{glass}}{\rho_{glass}}} \quad (4.7)$$

となる。式(4.1)~(4.7)を用いて体積割合を等しくした*IPF*[wt%]と*GPF*[wt%]の関係を Table 4.2 に示す。本実験では*IPF* = 0~45wt%の範囲で 5wt%間隔となるように*GPF*[wt%]を計算し、ガラスビーズを投入した。

Table 4.2 体積割合を等しくしたときの*IPF*[wt%]に対する*GPF*[wt%]

<i>IPF</i> [wt%]	<i>GPF</i> [wt%]
0	0
5	12.55
10	23.25
15	32.49
20	40.54
25	47.62
30	53.89
35	59.49
40	64.51
45	69.05

4.3 実験結果

温度毎のGPFと導電率の関係を Fig.4.5~4.7 に示す. 本結果より, 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, 塩分濃度 1wt%のときがGPFによる導電率の低下率が最も緩やかであり, サンプルの塩分濃度が高くなるに従い, 低下率は大きくなっていることがわかる.

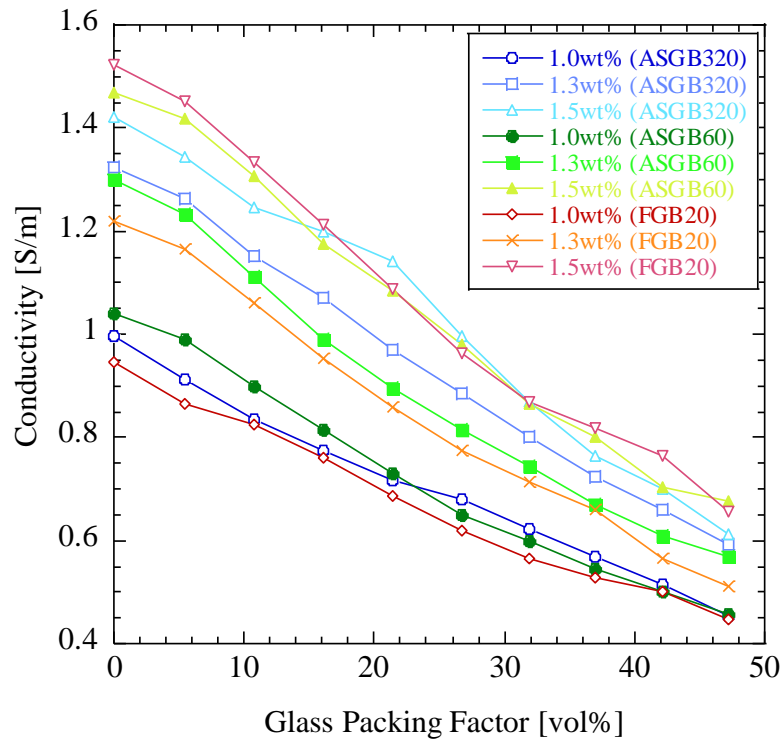


Fig. 4.5 GPFと導電率の関係(0°C)

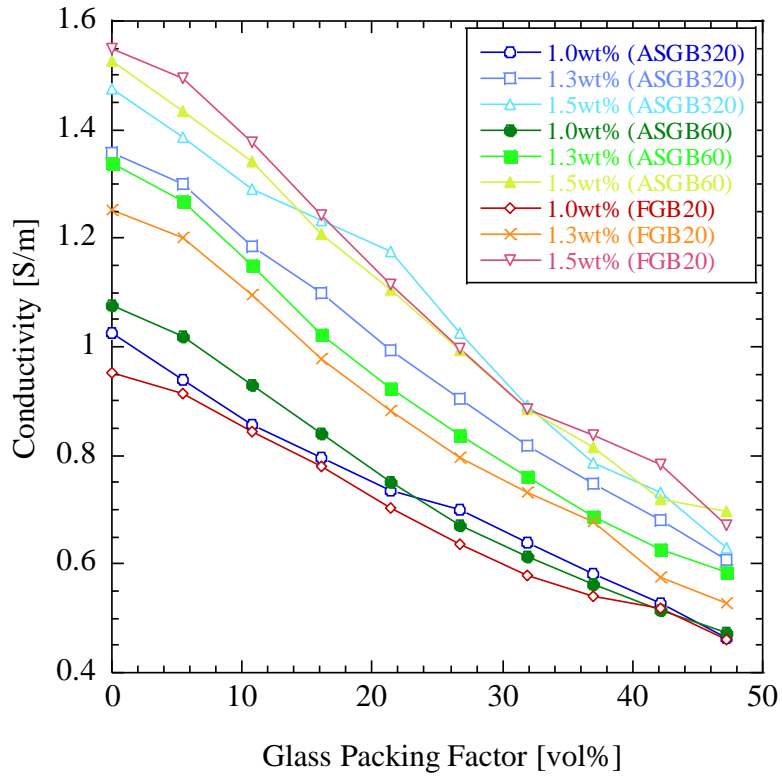


Fig. 4.6 GPFと導電率の関係(1°C)

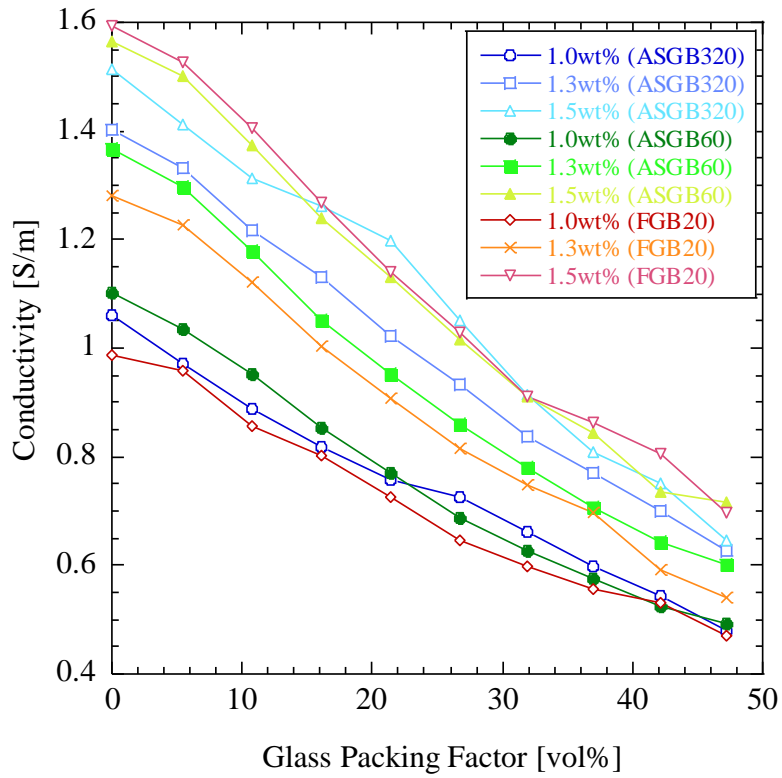


Fig. 4.7 GPFと導電率の関係(2°C)

4.4 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各温度での GPF_0 の値を Table 4.3~4.5, ガラスビーズ別の GPF_0 の平均値を Table 4.6 に示す。ガラスビーズの粒子径が大きいほど GPF_0 [vol%]の値が小さくなる傾向が見られる。電流はNaCl水溶液中に存在する Na^+ と Cl^- のイオンの移動によるものであるが、不導体の粒子径が大きければその移動は阻害され、電流は小さくなると考える。その結果、粒子径が大きいほど充填率に対しての導電率の減少割合が大きくなり、 GPF_0 [vol%]の値が小さくなったと考えられる。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 μm となっており、本実験で使用したガラスビーズでは ASGB60 が最も近い値となっている。従って、ASGB60 のガラスビーズの実験結果の平均値より、スラリーアイスを用いたIPF測定では $GPF_0 = 80.01\text{vol\%}$ を用いることとした。

Table 4.3 近似式から求めた $GPF_0(0^\circ C)$

Model number	Salinity		
	1.0wt%	1.3wt%	1.5wt%
ASGB320 (38~53 μm)	88.08	82.95	82.06
ASGB60 (250~355 μm)	79.97	79.00	81.38
FGB20 (710~1000 μm)	80.08	76.69	77.63

Table 4.4 近似式から求めた $GPF_0(1^\circ C)$

Model number	Salinity		
	1.0wt%	1.3wt%	1.5wt%
ASGB320 (38~53 μm)	87.54	83.04	81.54
ASGB60 (250~355 μm)	79.46	79.04	81.27
FGB20 (710~1000 μm)	80.16	76.97	77.65

Table 4.5 近似式から求めた $GPF_0(2^\circ\text{C})$

Model number	Salinity		
	1.0wt%	1.3wt%	1.5wt%
ASGB320 (38~53 μm)	87.49	82.95	81.99
ASGB60 (250~355 μm)	79.84	79.43	80.69
FGB20 (710~1000 μm)	80.12	76.91	78.00

Table 4.6 ガラスビーズごとの GPF_0 の平均値

Model number	Average
ASGB320 (38~53 μm)	84.18
ASGB60 (250~355 μm)	80.01
FGB20 (710~1000 μm)	78.24

GPF_0 [vol%]およびガラスビーズがない場合($GPF = 0\%$)の導電率 k_T [S/m]を用いると,
 GPF [vol%]と導電率の関係式は,

$$k = -\frac{k_T}{GPF_0} GPF[\text{vol}\%] + k_T \quad (4.8)$$

と表すことができる. 本式により, 水溶液中にガラスビーズが存在しているときの導電率
 k [S/m]を測定することで溶液のみの導電率 k_T [S/m]を推算することが可能となる. また, 本
実験ではスラリーアイス中に存在する氷粒子の代わりに体積を等しくしたガラスビーズを
用いて実験を行ったことから,

$$GPF[\text{vol}\%] = IPF[\text{vol}\%] \quad (4.9)$$

である. さらに, 氷の密度 ρ_{ice} [kg/cm³], 水の密度 ρ_w [kg/cm³]を用いると IPF [vol%]と
 IPF [wt%]には,

$$IPF[\text{vol}\%] = \frac{10^2 IPF[\text{wt}\%] \rho_w}{10^2 \rho_{ice} - IPF[\text{wt}\%](\rho_{ice} - \rho_w)} \quad (4.10)$$

の関係が成り立つ. ここで, スラリーアイスの IPF [wt%]は生成前の初期塩分濃度 x_0 [wt%],
生成中の塩分濃度 x_T [wt%]を用いると,

$$IPF[\text{wt}\%] = \left(1 - \frac{x_0}{x_T}\right) \times 10^2 \quad (4.11)$$

のように表すことができる。また、塩分濃度と導電率は線形的な関係を持つことから式(4.11)は導電率を用いると、

$$IPF[\text{wt}\%] = \left(1 - \frac{k_0}{k_T}\right) \times 10^2 \quad (4.12)$$

のように表すことができる。 $k_0[\text{S/m}]$ は生成前のNaCl水溶液の導電率(初期導電率)、 $k_T[\text{S/m}]$ は生成中のNaCl水溶液の導電率すなわち式(4.8)から求められる $k_T[\text{S/m}]$ と同等の導電率を示している。式(4.8), (4.9), (4.10), (4.12)より、

$$\frac{(\rho_{ice} - \rho_w)}{10^2} IPF[\text{wt}\%]^2 - \left\{ \rho_{ice} + \left(1 - \frac{k_0}{k}\right) (\rho_{ice} - \rho_w) - \frac{10^2 k_0 \rho_w}{k GPF_0} \right\} \quad (4.13)$$

$$IPF[\text{wt}\%] + 10^2 \left(1 - \frac{k_0}{k}\right) \rho_{ice} = 0$$

が成り立つ。式(4.13)より、初期導電率 $k_0[\text{S/m}]$ および生成中のスラリーアイスの導電率 $k[\text{S/m}]$ を測定することにより、 $IPF[\text{wt}\%]$ を求めることが可能となる。

第5章 導電率を用いたスラリーアイスのIPF測定

5.1 GPF_0 を用いたIPF測定

5.1.1 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 $GPF_0 = 80.01\text{vol}\%$ がIPF測定に有効であるかを調べた。

5.1.2 実験方法

スラリーアイス製氷装置の概要を Fig.5.1, 導電率測定の概要を Fig.5.2 に示す。このとき、攪拌により発生する旋回流に対して、セルの平面が平行となるように Fig.4.2 に示すセルをジェネレーター内上部に取り付けた。タンク内にNaCl水溶液を溜め、チラー(第一工業株式会社, ファーストブラインチラーユニット, FSC-X101ABT-S)を用いて 5°C まで予冷したあとポンプ(三相電機, マグネットポンプ, PMD-121B6J)によりジェネレーター内にNaCl水溶液を送水した。ジェネレーター内が満水状態になったときにポンプを停止し、モーター(三菱電機, ギヤードモータ, GM-SPF 1.5kW 1/3)と冷凍機を稼働させ攪拌速度 300min^{-1} で攪拌を行った。このとき、氷生成前の導電率(初期導電率 k_0)を得るために、溶液温度が約 -0.8°C となったときにセル間の電流, 電圧値を 3.2.2 項と同様のデジタルマルチメーターで計測し、その値を PC に取り込み、導電率の計算を行った。伝熱面に氷膜が生成されてから 1 分後、ポンプによりNaCl水溶液をジェネレーター内に $1\text{L}/\text{min}$ で連続的に送水し、スラリーアイスの生成, 排出を行った。最初の排出を 0 分とし 30 秒間隔でデジタルマルチメーターにより電流, 電圧値を計測し、その値を PC に取り込み導電率の計算および式(4.13)を用いてIPFへの変換を行った。また、サンプリング方式として、5 分間隔で排出されたスラリーアスを漏斗およびフィルター(日本製紙クレシア, キムワイプ S-200)を用いて固液分離し、NaCl溶液をサンプリングした。その後、塩分濃度計(ATAGO, PAL-SALT)を用いて濃度を測定し、式(1.10)よりIPFの算出を行った。なお、初期導電率取得前にマルチ水質計(TOADKK, MM-60R)および導電率セル(TOADKK, CT-57101B)を用いてジェネレーターから排出されるNaCl水溶液の導電率測定を行い、デジタルマルチメーターでセルの電流, 電圧値を測定し、式(2.5)より実験毎にセル定数の計算を行った。交流波形の入力および電流増幅回路の直流電源には 3.1.2 項と同様の機器を用いた。

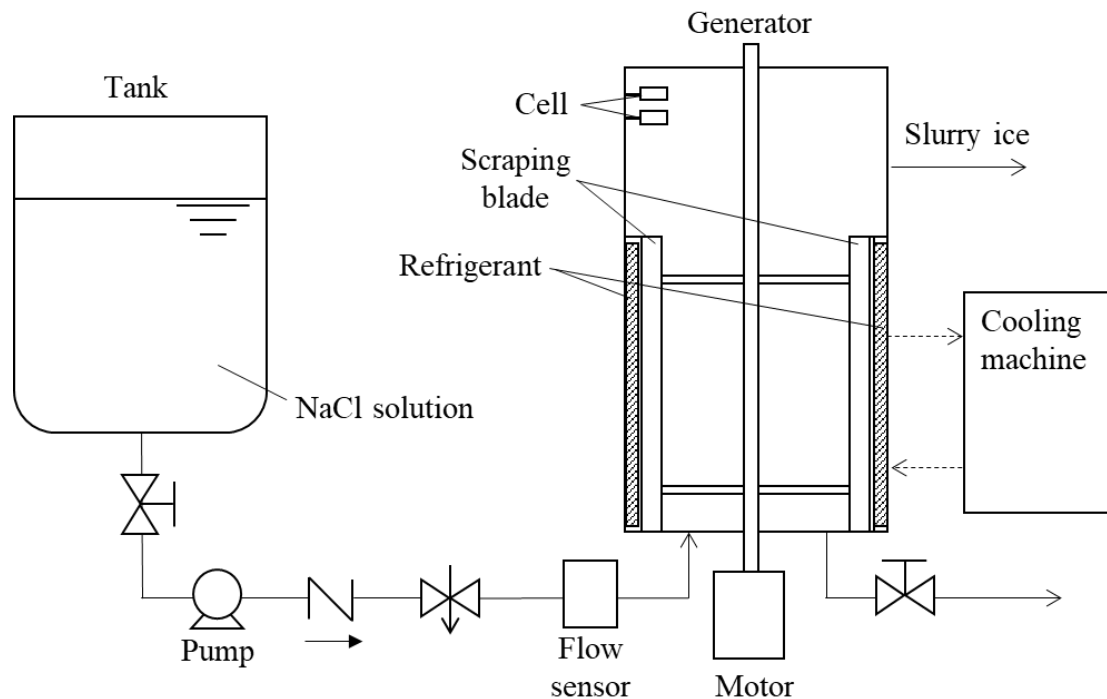


Fig. 5.1 スラリーアイス製氷装置の概要

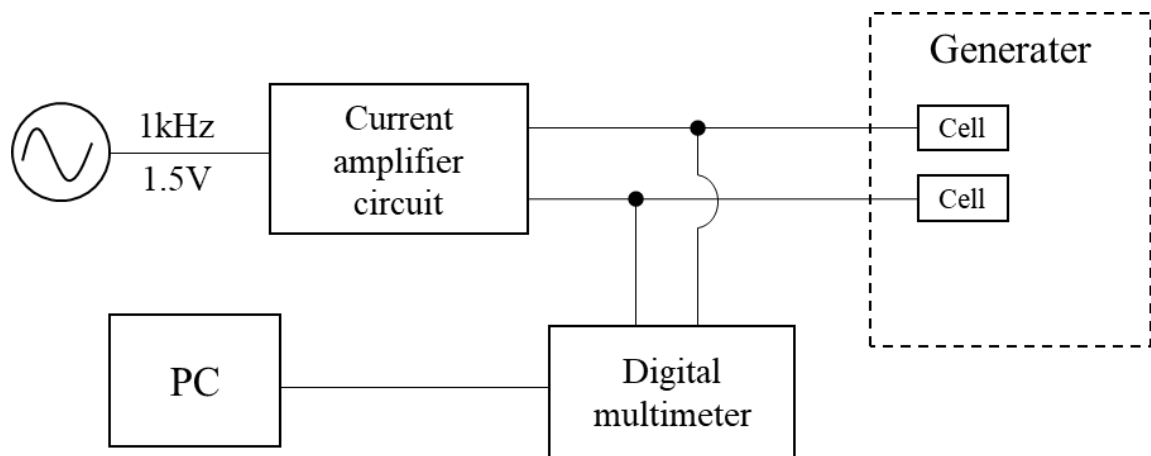


Fig. 5.2 導電率測定の概要

5.1.3 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 Fig.5.3～5.5 に示す。セル方式の IPF は、サンプリング方式の5分間隔に合わせるため5分毎の前後30秒間となる計3個のデータの平均を表している。本実験ではサンプリング方式により測定した 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、3回ともに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 差は最小で約10wt%，最大では約22wt%にまで広がっていることがわかる。

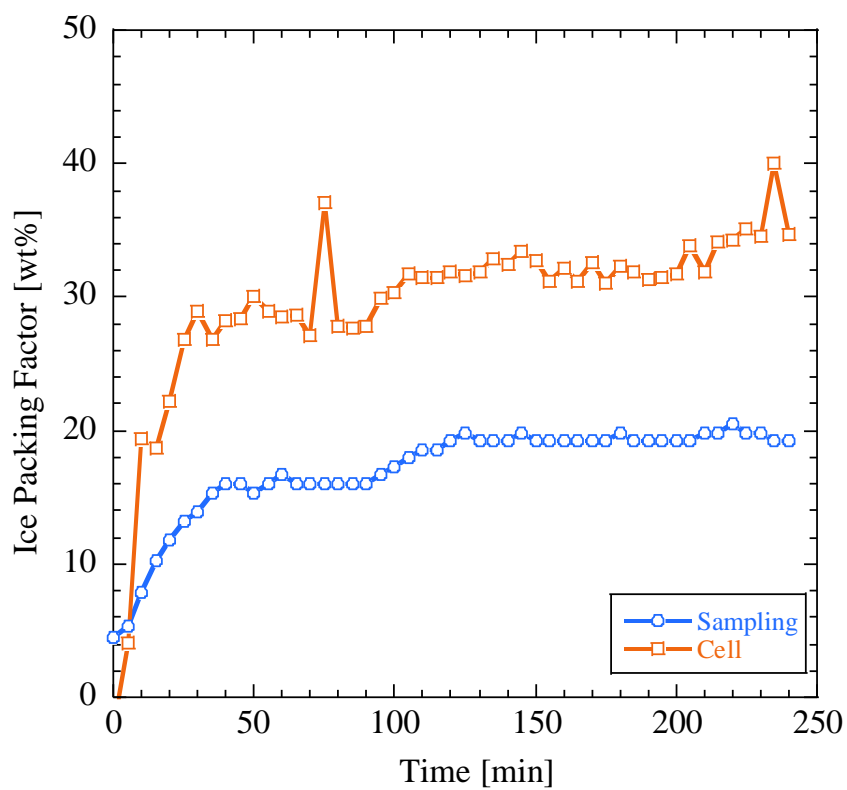


Fig. 5.3 スラリーアイスにおける IPF 測定結果(1回目)

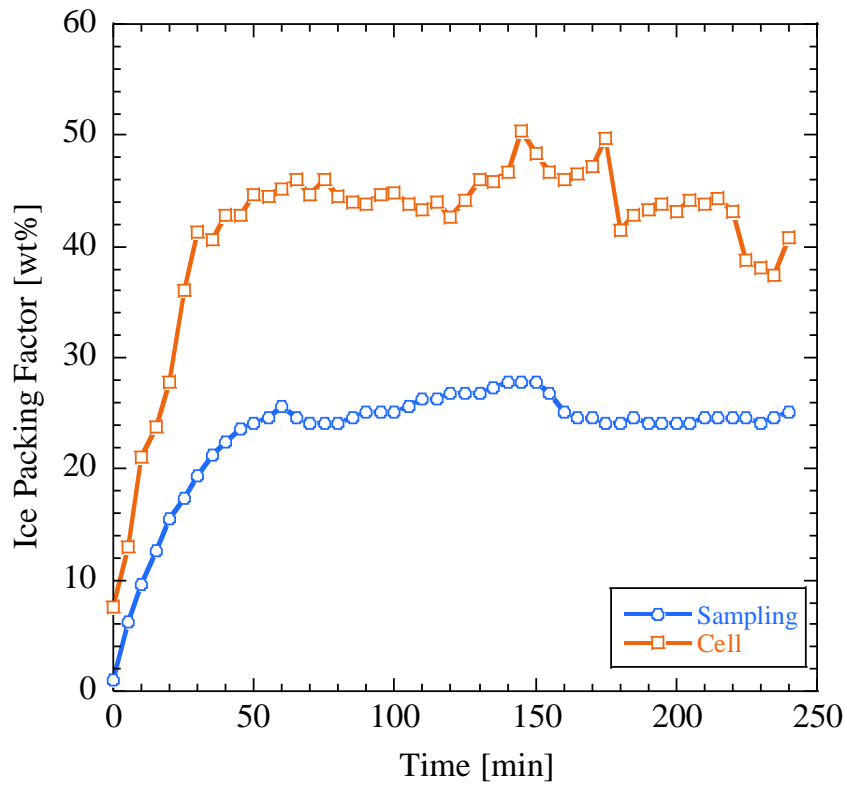


Fig. 5.4 スラリーアイスにおけるIPF測定結果(2回目)

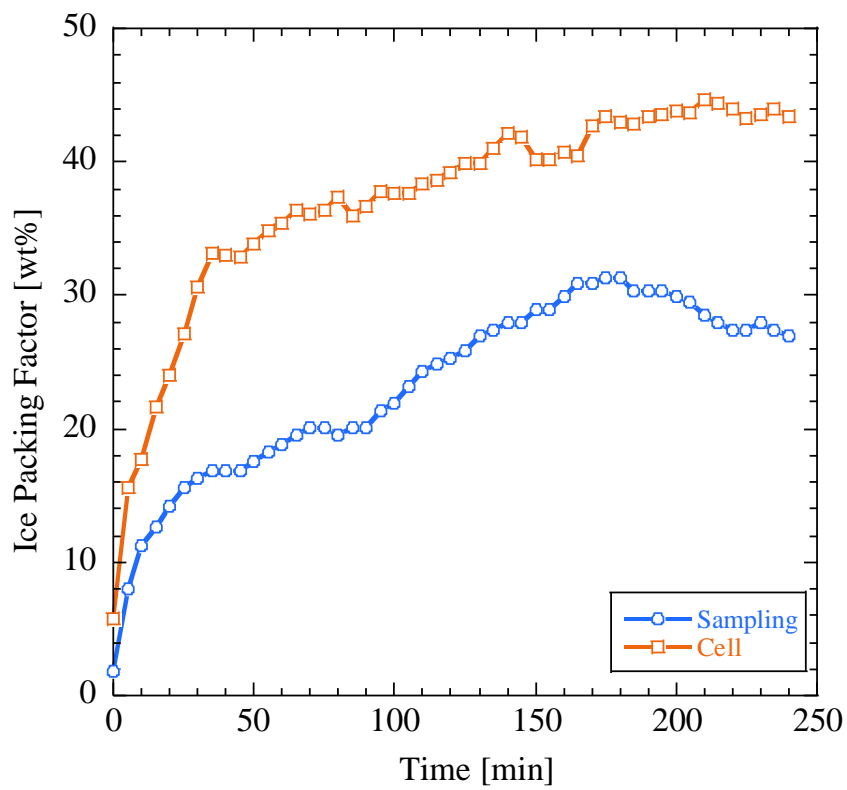


Fig. 5.5 スラリーアイスにおけるIPF測定結果(3回目)

5.1.4 考察

セル方式では式(4.13)を用いて導電率からIPFを算出しているが、本式において密度 ρ_w 、 ρ_{ice} は既知であり、初期導電率 k_0 および測定導電率 k は実験中に求められる値である。しかし、 GPF_0 は第4章で行ったガラスビーズを用いた実験により導出した実験値である。このことから、 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とが考えられる。ここで、野村らの「牛乳-強電解質系の導電率に及ぼす主要固形成分の影響」^[6]によると、乳糖やカゼインなどの導電率低下率はそれぞれの成分により異なるということが報告されている。このことより、ガラスビーズと氷粒子では成分が異なることから、導電率の低下率が異なっていることが考えられる。そこで次節ではスラリーアイス中の氷粒子による導電率の低下率を算出した。

5.2 IPF₀を用いたIPF測定

5.2.1 IPF₀の算出方法

スラリーアイスはIPFの増加とともに塩分濃度の上昇および不導体である氷粒子の増加が起きている。そこで、氷粒子の増加による導電率の低下のみに着目する。式(4.12)よりスラリーアイス生成中のNaCl水溶液の導電率 k_T [S/m]について展開すると、

$$k_T = \frac{-100k_0}{IPF[\text{wt}\%] - 100} \quad (5.1)$$

となる。前節の実験結果より初期導電率 k_0 、 $IPF[\text{wt}\%]$ 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 を計算で求めることが可能となる。実験中に測定した導電率 k は氷粒子によって k_T から導電率が低下した値となっているので、氷粒子による導電率の低下率 α [-]は

$$\alpha = \frac{k}{k_T} - 1 \quad (5.2)$$

と表すことができる。式(5.2)を用いて前節の実験結果から $IPF[\text{wt}\%]$ に対する導電率の低下率を Fig.5.6 に示す。Fig.5.6 より $IPF = 1\text{wt}\%$ 当たり導電率は1.70%低下しているということがわかる。

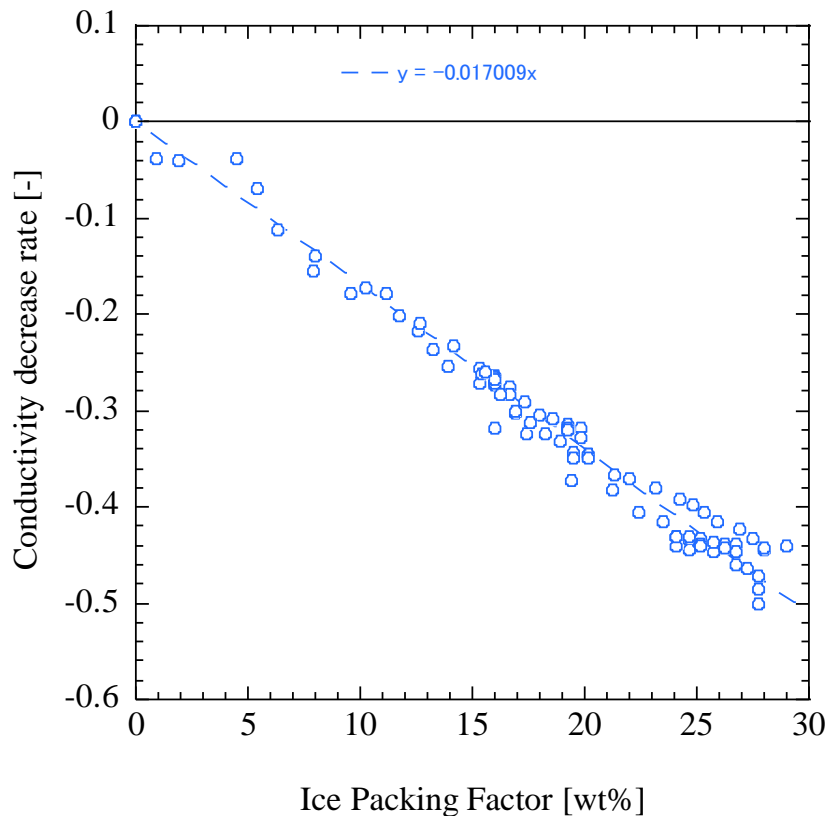


Fig. 5.6 IPF [wt%]に対する導電率の低下率

ここで、前節の実験結果の IPF [wt%]を式(4.10)を用いて IPF [vol%]に変換し、 IPF [vol%]に対する導電率の低下率を Fig5.7 に示す. Fig5.7 より $IPF = 1\text{vol\%}$ 当たり導電率は1.59%低下しているということがわかる. これより、導電率の低下率が100%すなわち導電率が0となる IPF [vol%]の値が求められる. この値を IPF_0 とおくと、

$$IPF_0[\text{vol\%}] = \frac{100}{\alpha} \quad (5.3)$$

より、 $IPF_0 = 62.89\text{vol\%}$ となることがわかる. また、第4章のガラスビーズ用いた実験でも同様に GPF [vol%]と導電率の低下率について求めると、Fig.5.8 より $GPF = 1\text{vol\%}$ 当たり導電率は1.26%低下しており、 $GPF_0 = 79.36\text{vol\%}$ となる. 第4章で近似式より算出した GPF_0 は80.01vol%であり、非常に近い値を示していることがわかる. 従って、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、これによってセル方式とサンプリング方式の IPF 差が生じたと考えられる.

ガラスビーズと氷粒子の1vol%当たりの導電率の低下率は氷粒子の方が大きいことがわかる. これから、ガラスビーズよりも氷粒子の方が電気を流しにくいということが考えられる. しかし、それぞれの体積抵抗率は研究報告より氷粒子が $4 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ [7], ガラスビーズが $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ [8]となっており、ガラスビーズの方の抵抗率が大きいため本実験結果と矛盾

盾する。そこで、氷粒子の導電率の低下率が大きくなった原因としては、ガラスビーズの形状は定常に対して、氷粒子については非定常状態である。すなわち、氷粒子の融解が発生し氷粒子の周囲に局所的な塩分濃度の分布が生じたことが考えられる。導電率による IPF 測定は、セル間という狭領域で行われており、計測時には少なからずセルが発熱している。よって、スラリーアイスでの IPF 測定を行うにあたっては、式(4.13)の GPF_0 の代わりにスラリーアイス独自の $IPF_0 = 62.89\text{vol}\%$ を用いる必要がある。

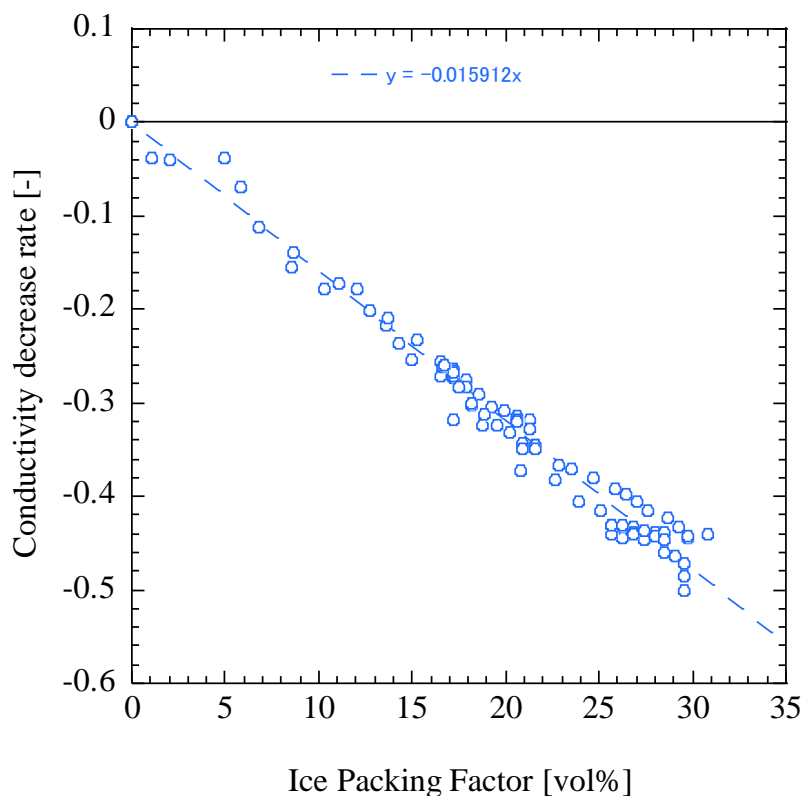


Fig. 5.7 $IPF[\text{vol}\%]$ に対する導電率の低下率

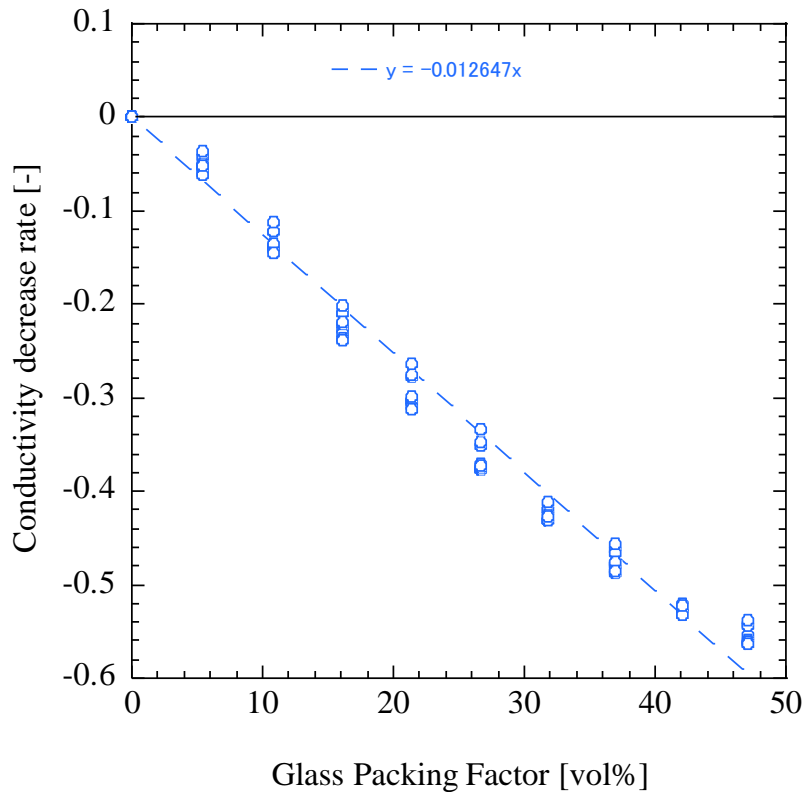


Fig. 5.8 GPF[vol%]に対する導電率の低下率

5.2.2 目的

IPF測定を 5.1 節で行ったが、セル方式とサンプリング方式でIPFに差が生じた。これにより前項ではスラリーアイスにおける IPF_0 の値を算出したが、この値を用いることでセル方式とサンプリング方式のIPF差はどのように変化するかを 5.1 節の実験結果を用いて検証すること、また、攪拌速度を変化させた場合に IPF_0 の値は変化するかを実験的に調べることを目的とした。

5.2.3 実験方法

実験は 5.1.2 項と同様の手順で行った。なお、攪拌速度は 400min^{-1} 、 500min^{-1} の 2 条件で 3 回ずつ行った。

5.2.4 実験結果

5.1 節で行った攪拌速度 300min^{-1} でのセル方式のIPFを IPF_0 を用いて算出した結果を Fig.5.9～5.11 に示す。また、攪拌速度 400min^{-1} でサンプリング方式とセル方式により測定したスラリーアイスのIPFを Fig5.12～5.14、攪拌速度 500min^{-1} で測定した結果を Fig5.15～5.17 に示す。 300min^{-1} では GPF_0 を用いたときよりもサンプリング方式とセル方式のIPF差が小さくなったことがわかる。 300min^{-1} の 1, 2 回目においては実験終了の 240 分後までセル方式によってIPFを測定することができたといえる。 400min^{-1} はセル方式のIPFが大きく

上昇している箇所を除けばサンプリング方式と近い値を示していることがわかる。
 500min^{-1} では $IPF_0 = 62.89$ を用いてもセル方式とサンプリング方式では差が生じる結果となった。また、 300min^{-1} 、 400min^{-1} と比較すると 500min^{-1} ではセル方式の IPF の変動が大きいことがわかる。

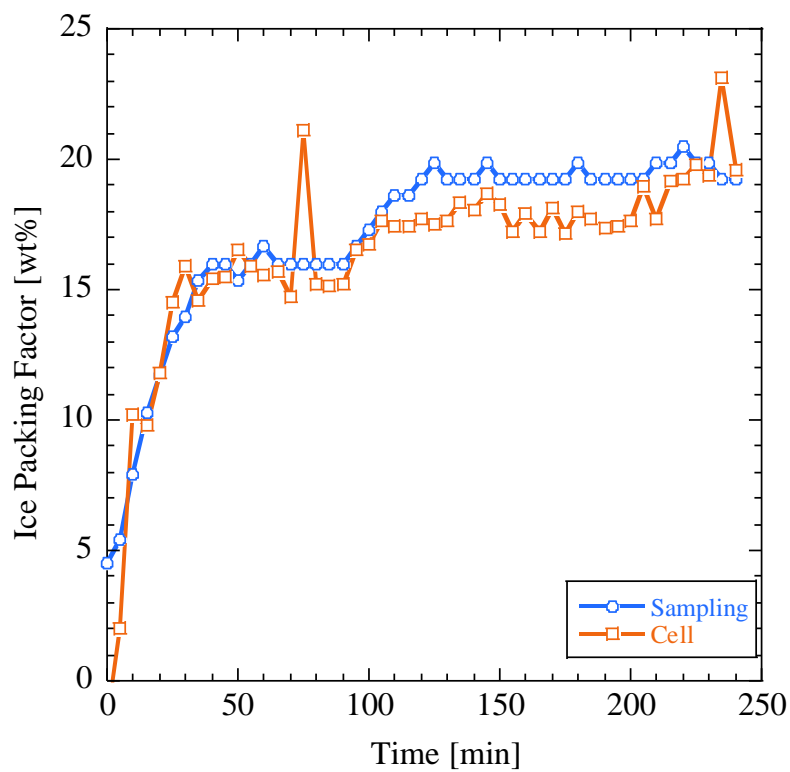


Fig. 5.9 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(300min^{-1} , 1回目)

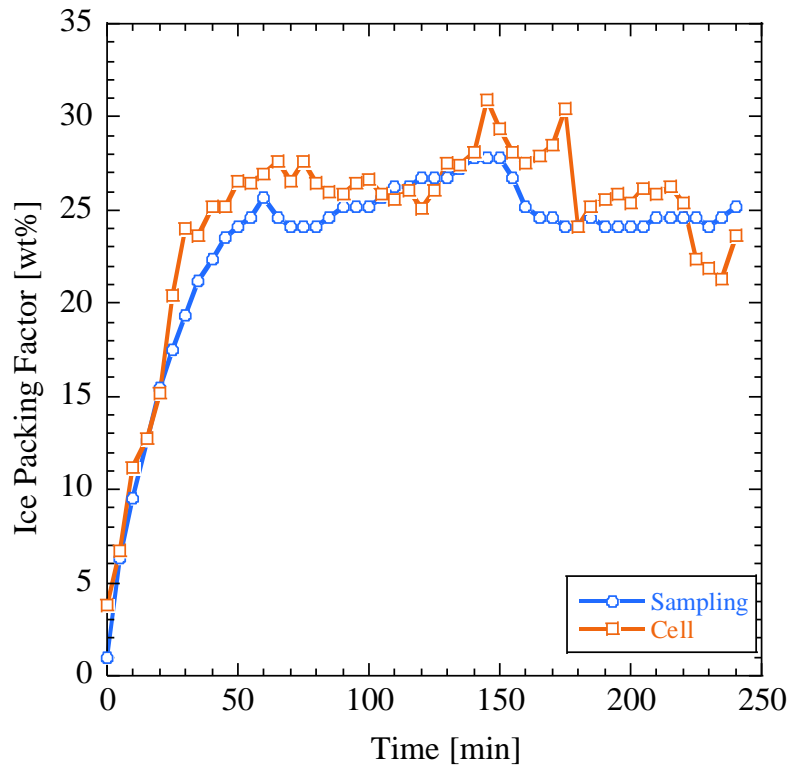


Fig. 5.10 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(300min^{-1} , 2回目)

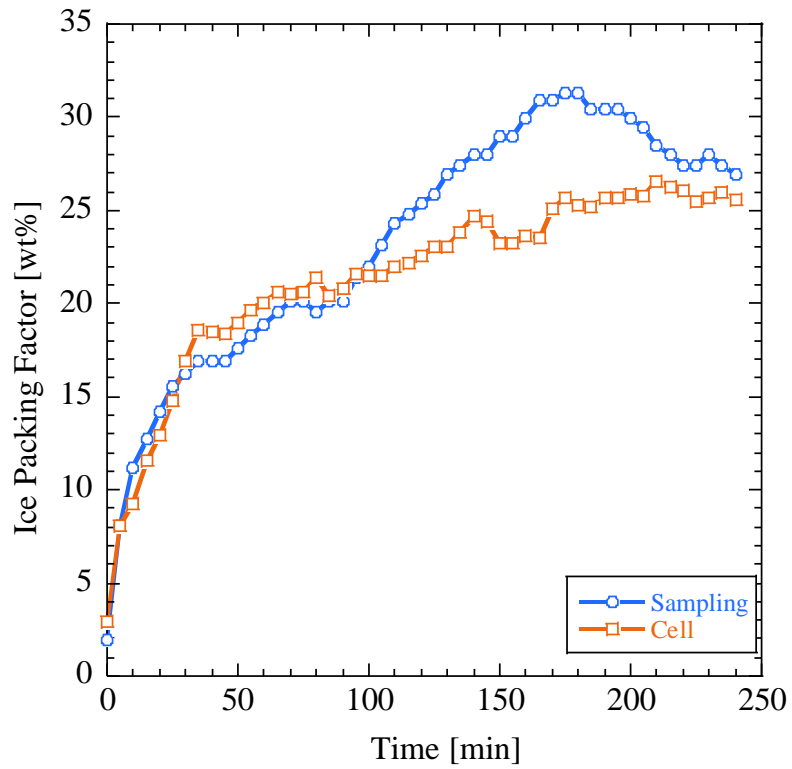


Fig. 5.11 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(300min^{-1} , 3回目)

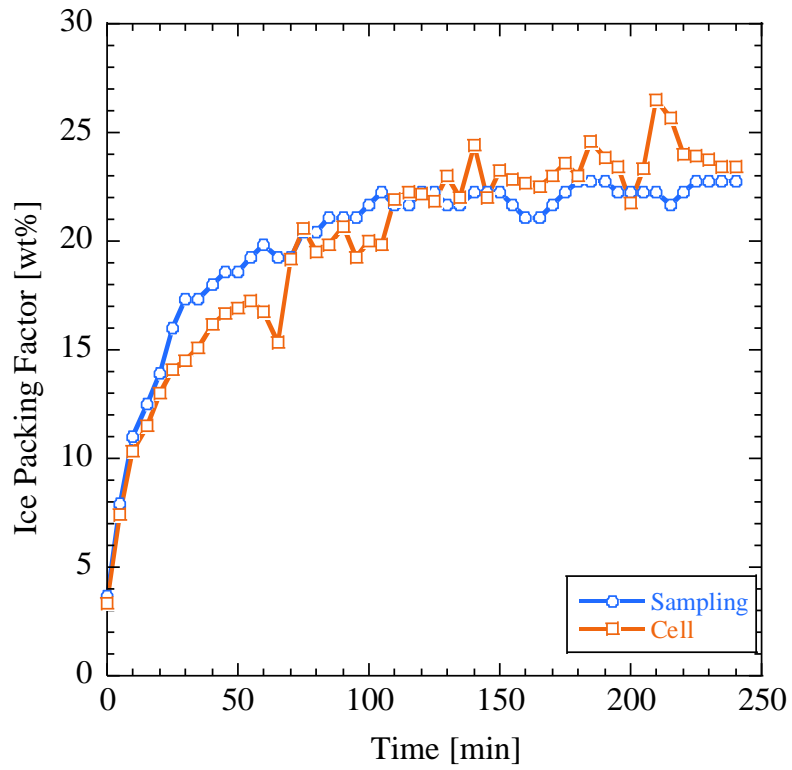


Fig. 5.12 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(400min^{-1} , 1回目)

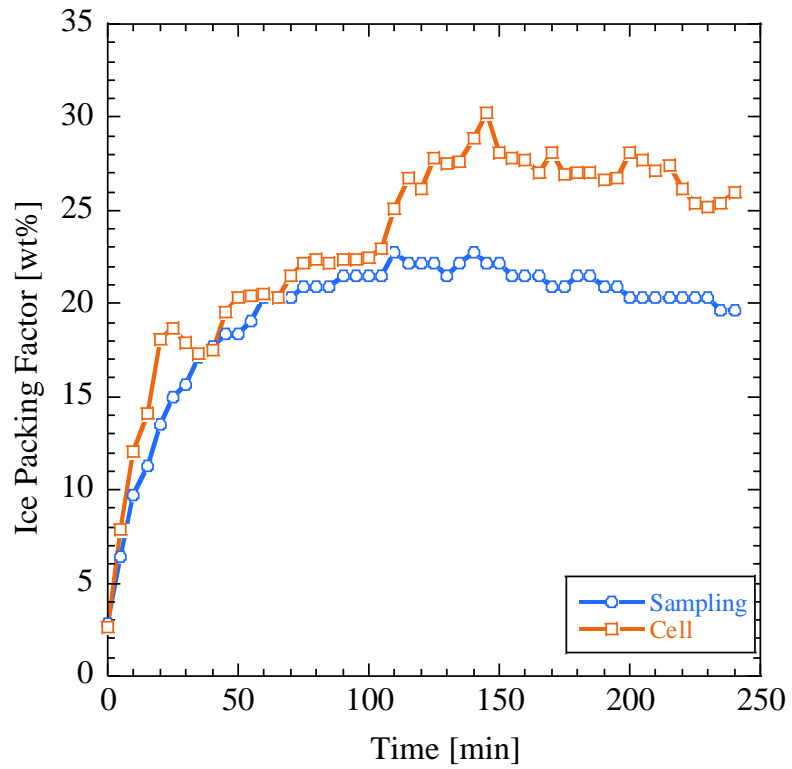


Fig. 5.13 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(400min^{-1} , 2回目)

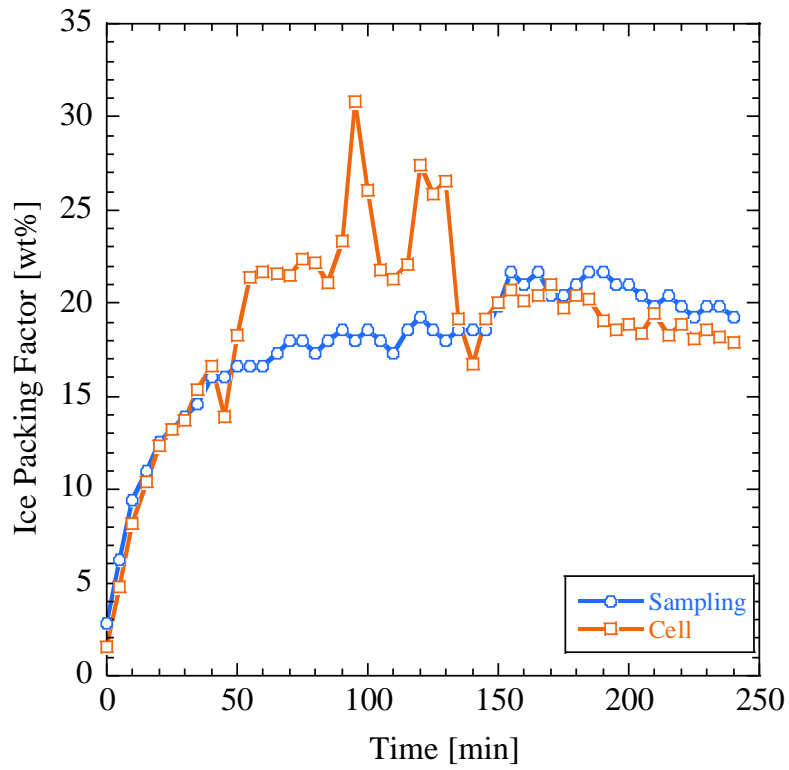


Fig. 5.14 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(400min^{-1} , 3回目)

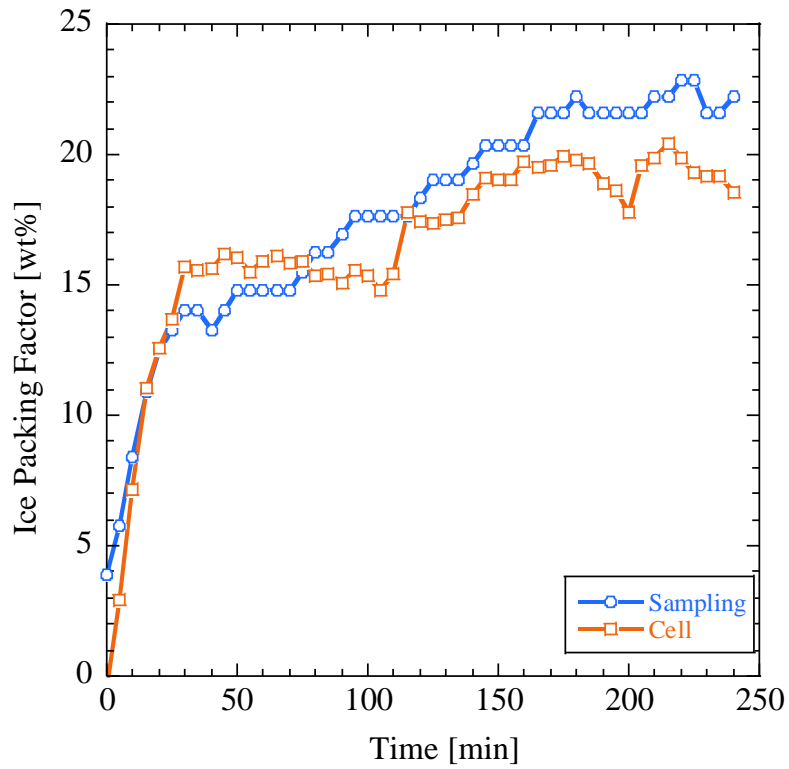


Fig. 5.15 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(500min^{-1} , 1回目)

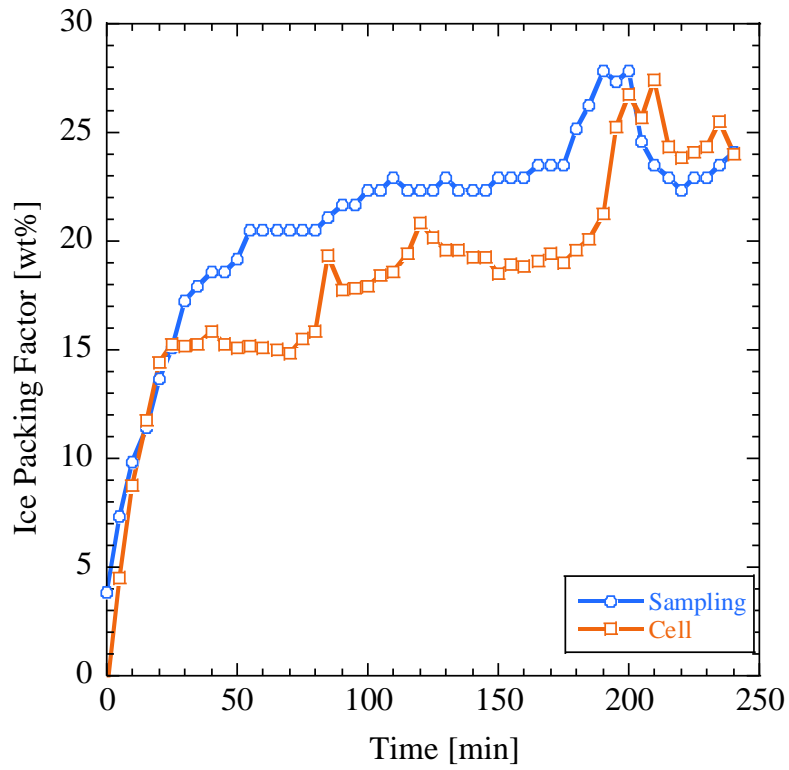


Fig. 5.16 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(500min^{-1} , 2回目)

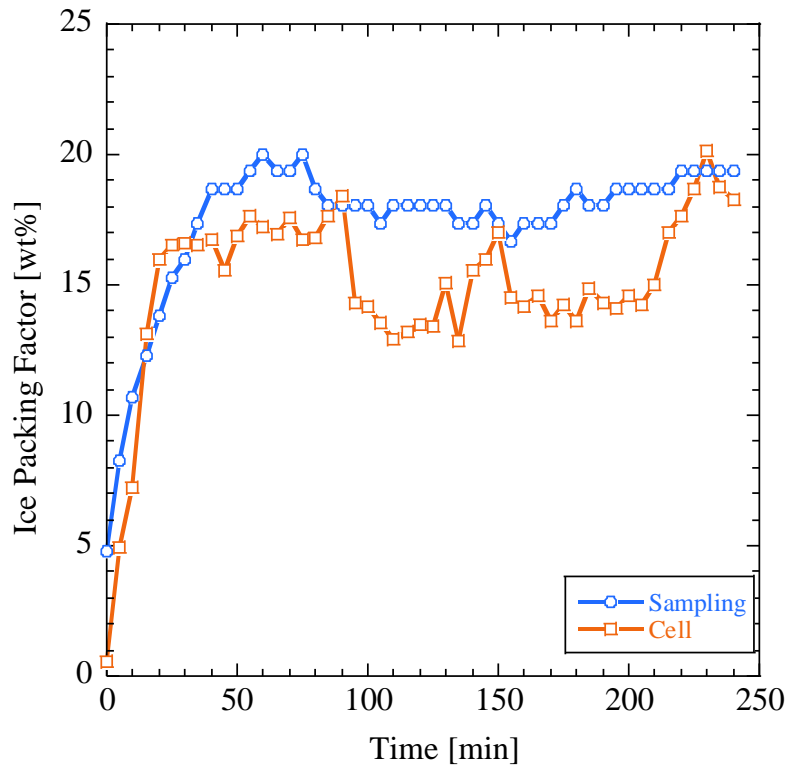


Fig. 5.17 IPF_0 を用いた IPF 測定結果(500min^{-1} , 3回目)

5.2.5 考察

$IPF_0 = 62.89\text{vol}\%$ を用いた結果、セル方式とサンプリング方式の IPF 差が小さくなったことから、式(4.13)および IPF_0 の有効性を確認することができたと考える。

ここで、攪拌速度ごとにサンプリング方式の $IPF[\text{wt}\%]$ を横軸、セル方式の $IPF[\text{wt}\%]$ を縦軸とした実験結果を Fig.5.18~5.20 に示す。実線はサンプリング方式の IPF 、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。本研究で用いている塩分濃度計は分解能が 0.01% となっており、それに伴う IPF の誤差は塩分濃度が低いほど大きく、最大で約 $1\text{wt}\%$ となる。また、セル方式とサンプリング方式の IPF 差の許容範囲を $\pm 1\text{wt}\%$ とすると、塩分濃度計による誤差と合わせて点線で示す $\pm 2\text{wt}\%$ の範囲にセル方式の IPF が収まるのが実用化を想定した場合に望ましい。 300min^{-1} では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がわかる。 400min^{-1} では $IPF=20\sim 25\text{wt}\%$ の範囲でセル方式の IPF が大きくなっているが、これは Fig.5.21 に示すようにセル付近に氷が堆積し、導電率に影響を与えたことが原因だと考えられる。これを解消するためには、セル間の距離を現在の 15mm よりも大きくする必要がある。セル間の距離を大きくすると3.1節でも示したように測定できる電流値が小さくなるためセルへの印加電圧を増加させる必要がある。 500min^{-1} では点線外にプロットが多く存在している。ここで攪拌速度ごとの実験中のジェネレーター上部の様子を Fig.5.22 に示す。攪拌速度が大きくなるに従って、中心部の空洞が広がっていることがわかる。これは攪拌による外向き水平方向の遠心力 $m r \omega^2$ が働いていることが原因だと考えられる。ここで m は水面上の任意の点の質量、 r は半径方向の座標、 ω は回転角速度である。 n を攪拌速度 $[\text{min}^{-1}]$ とすると、

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (5.4)$$

となるので攪拌速度が増加すれば遠心力も増加し、中心部の空洞が広がったと考えられる。また、Fig.5.22(c)より 500min^{-1} ではセルと中心部の空洞との距離が近く、導電率を正確に測定できていなかった可能性がある。これによって、他の攪拌速度よりもセル方式の IPF の変動が大きく、サンプリング方式との差も大きくなったと考えられる。

次に、攪拌速度ごとの IPF_0 を算出する。5.2.1項と同様に 400min^{-1} 、 500min^{-1} の $IPF[\text{vol}\%]$ に対する導電率の低下率を Fig.5.23, 5.24 に示す。なお、セル方式において IPF の急激な上昇が見られた箇所は測定エラーとし、データからは除いている。 400min^{-1} では $IPF = 1\text{vol}\%$ 当たり導電率は 1.60% 低下しており、 $IPF_0 = 62.50\text{vol}\%$ となる。 500min^{-1} では $IPF = 1\text{vol}\%$ 当たり導電率は 1.51% 低下していることから $IPF_0 = 66.23\text{vol}\%$ となる。しかし、 500min^{-1} では中心部の空洞の影響により導電率の測定が正確に行えていなかった可能性があるため、再度実験する必要があると考えられる。そこで、本章では 300min^{-1} と 400min^{-1} について考察する。 300min^{-1} と 400min^{-1} において $IPF = 1\text{vol}\%$ 当たりの導電率の低下率は 0.01% の差であり、 IPF_0 に関しても $0.39\text{vol}\%$ の差となっており、 300min^{-1} とほぼ等しい値となること

がわかる. このことから $300\sim 400\text{min}^{-1}$ の範囲では攪拌速度による IPF_0 の変化は見られない
ということがいえる.

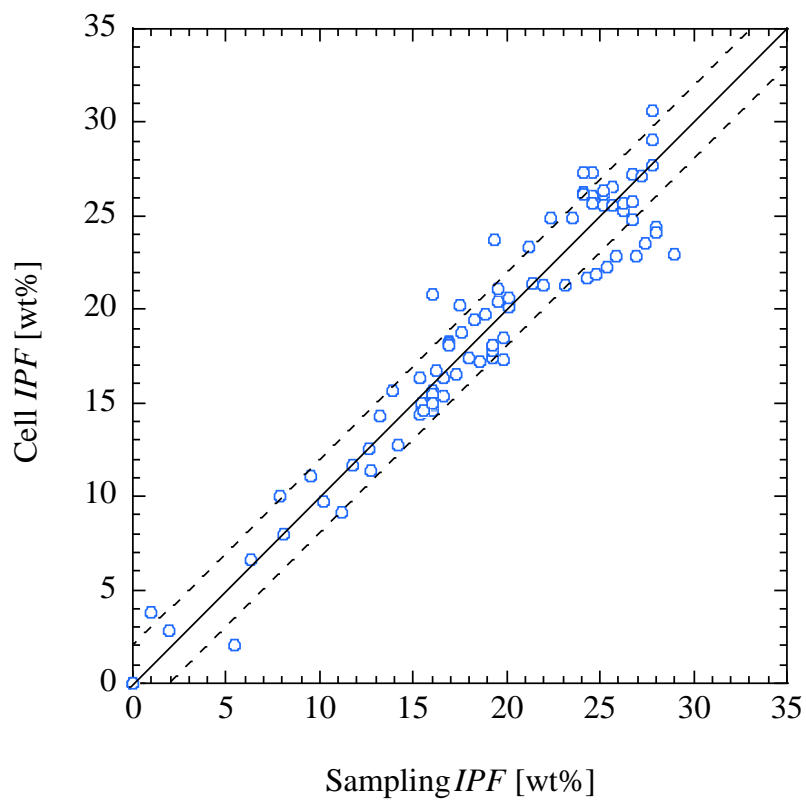


Fig. 5.18 サンプルング方式とセル方式の IPF 差 (300min^{-1})

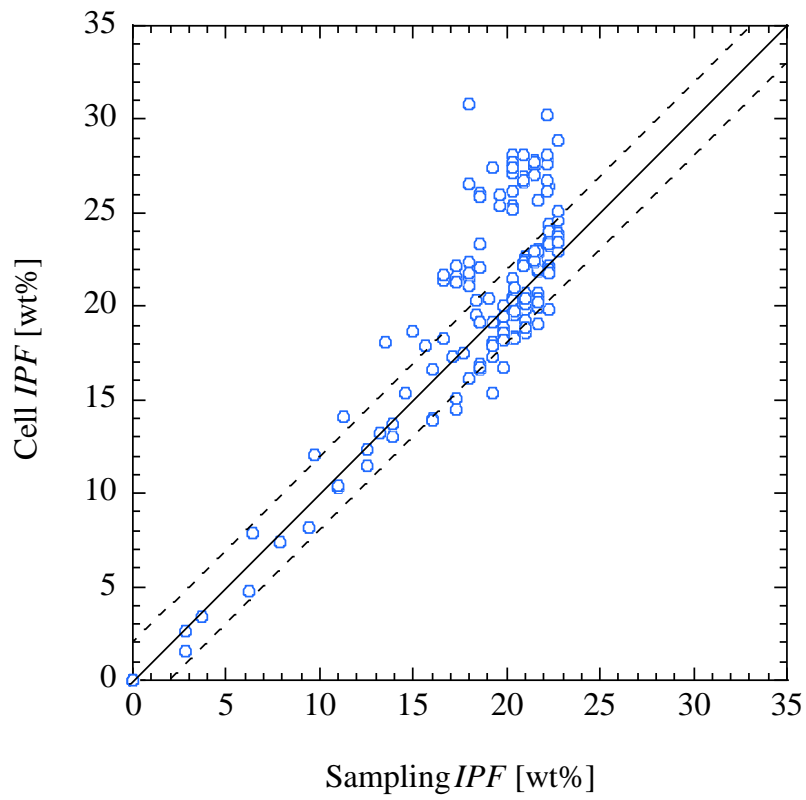


Fig. 5.19 サンプルング方式とセル方式の*IPF*差(400min⁻¹)

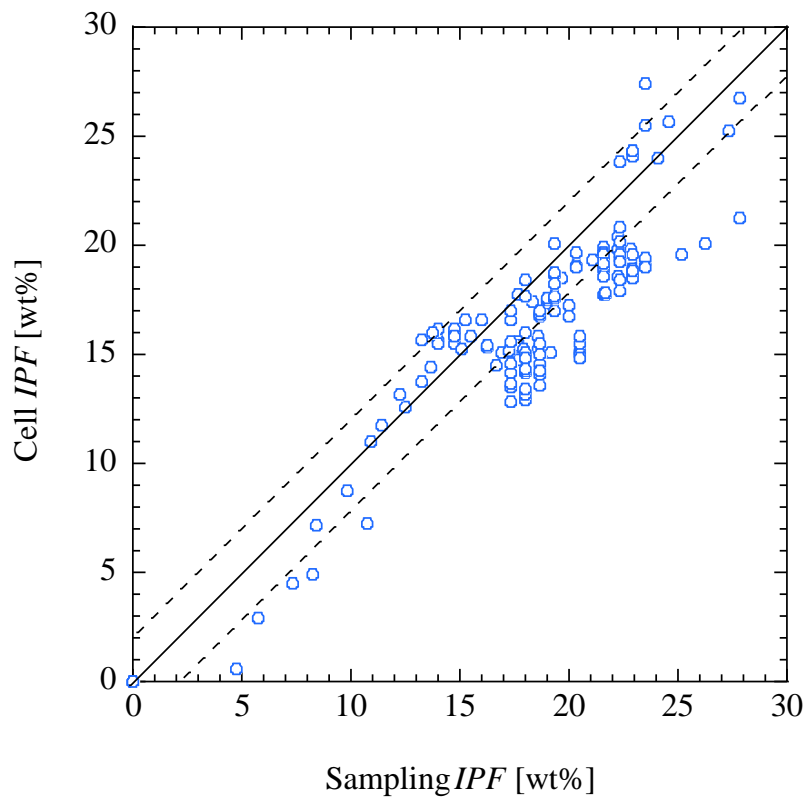


Fig. 5.20 サンプルング方式とセル方式の*IPF*差(500min⁻¹)



Fig. 5.21 実験終了時のセルの様子

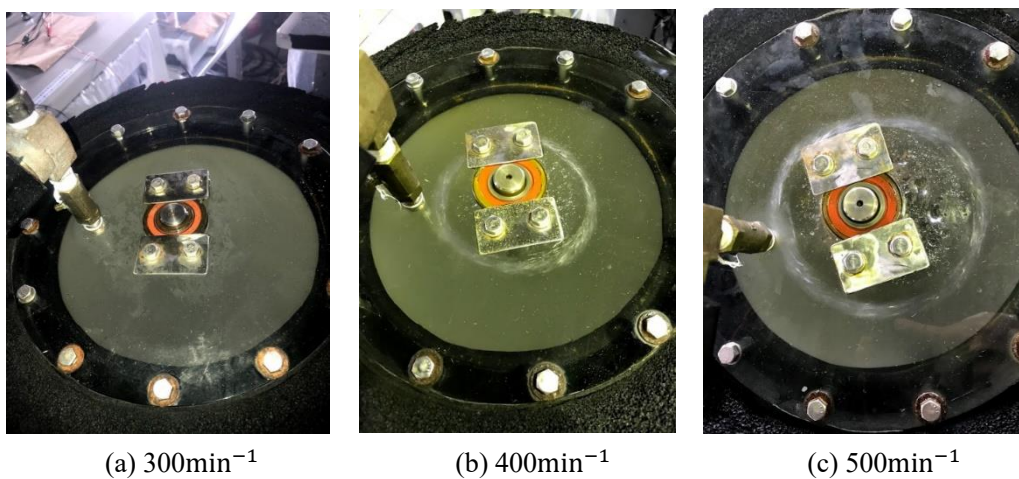


Fig. 5.22 実験中のジェネレーター上部

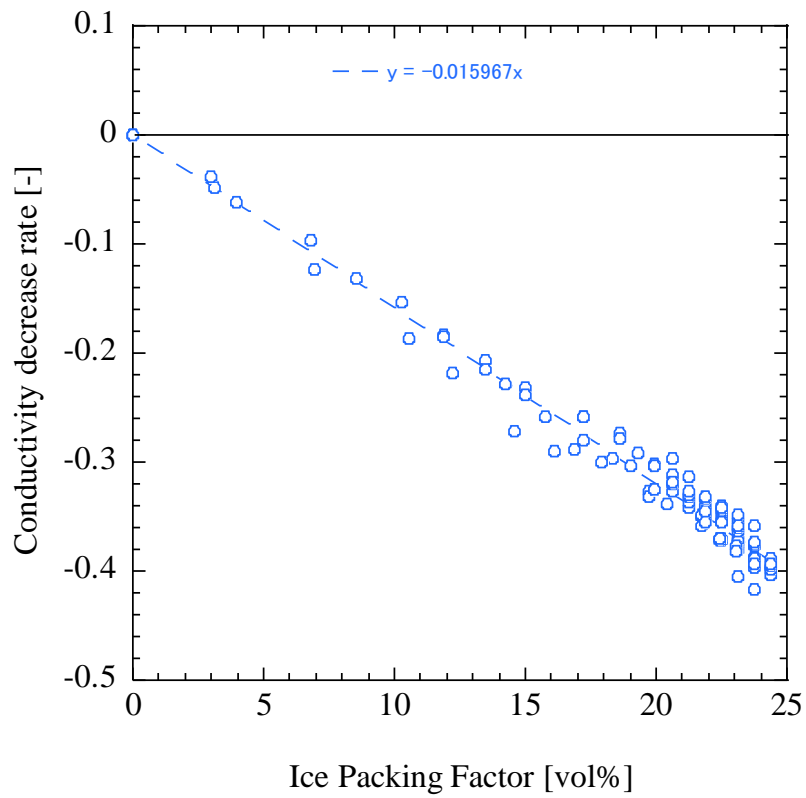


Fig. 5.23 IPF[vol%]に対する導電率の低下率(400min⁻¹)

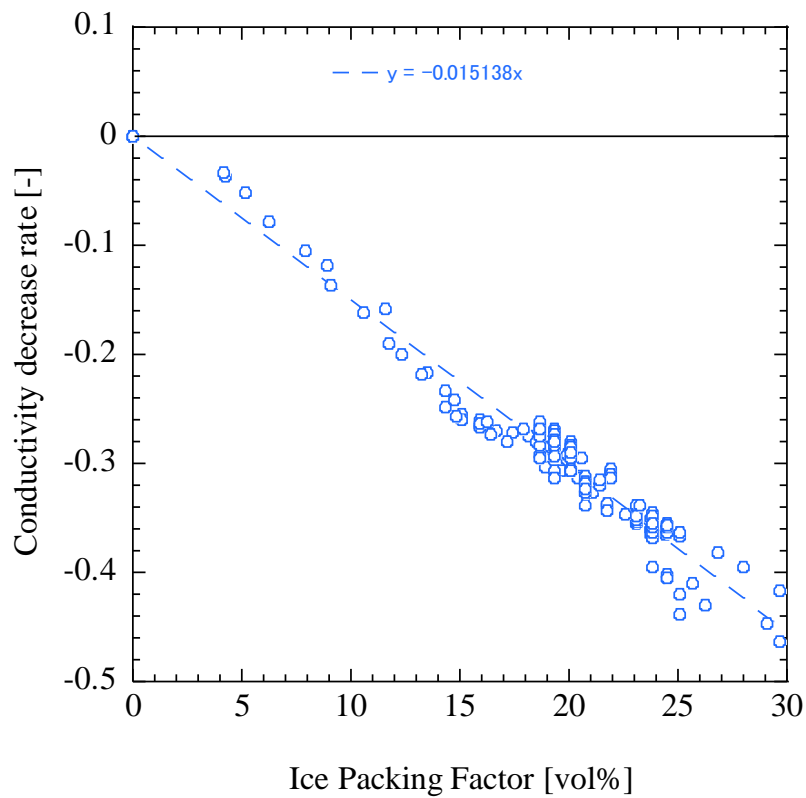


Fig. 5.24 IPF[vol%]に対する導電率の低下率(500min⁻¹)

第6章 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開発を目的とした。 IPF 測定方法として凝固点降下や粘度の変化を測定する方法が先行研究で行われてきたが、本研究では導電率を用いた IPF 測定について検討を行った。スラリーアイスは生成中に氷粒子の増加および $NaCl$ 水溶液の濃縮による塩分濃度の増加という2つの現象が同時に起こっている。これらは導電率に影響を与えるため、まず第3章でスラリーアイスの温度帯における塩分濃度と導電率の関係を実験的に求めた。その結果、スラリーアイスの温度帯においても塩分濃度と導電率は線形的な関係にあることが確認できた。第4章では不導体の充填率と導電率の関係を調べるため、氷粒子の代わりにガラスビーズを用いた実験を行った。 GPF の増加に伴い、導電率は線形的に減少するという結果から、 GPF_0 の存在が明らかとなり、第5章では導出した導電率と IPF の関係式を用いてスラリーアイスの IPF 測定を行った。しかし、第4章で算出した GPF_0 ではセル方式とサンプリング方式で10%以上の IPF 差が生じる結果となった。そこで、 IPF に対する導電率の低下率を算出し、スラリーアイスの IPF_0 を明らかにした。 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。しかし、セル間への氷粒子の堆積解消や、実用化に向けて消費電力を小さくするためのセルへの最適な印加電圧の解明など、これらの課題の対策は必要である。

参考文献

- [1] 渡邊悦夫, 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 卷, 5 号, pp. 18-21, 2005.
- [3] 角中和人, “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” .
- [4] 田村英雄, 松田好晴, 現代電気化学, 培風館, 1977.
- [5] “導電率計の校正溶液について,” 横河電機株式会社,
<https://www.yokogawa.co.jp/library/resources/faqs/an-sc-isc-06-calibration-solution/>.
- [6] 野村孝一, 坂本雄司, 松本清, 箴島豊, “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 卷, 31 号, pp. 790-794, 1984.
- [7] “熱の実験室－新館第 10 回氷の電気伝導,” 八光電気,
<https://www.hakko.co.jp/expe/new/exnew1002.htm>.
- [8] 鈴木巧一, 尾山卓司, “材料[Ⅱ] 2.無機材料－ガラス材料,” 真空技術講座 超高真空実験のために(9), 第 31 卷, 7 号, p. 706, 1988.

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご教授を頂きました高知工科大学システム工学群
松本泰典准教授に深く感謝いたします。

株式会社コア電子の楠本智明工場長、板谷茂氏、竹井智也氏、松岡順一氏、凸版印刷株
式会社の富永和仁部長、酒井史典氏、松村晃人氏には実験にあたり、ご教授、ご協力を頂
きましたことをここに厚く御礼申し上げます。