遠心分離機が及ぼす氷粒子融解の定量化と抑制の実験的検証

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1240096 谷本 琉之佑

2.3 実験方法

遠心分離機による氷融解量を得る基礎データを収集する ため、遠心分離機を用いない凍結濃縮システムを図 2-2 に示 すように作製した.また、遠心分離機を用いる場合について は、図 2-3 のように製氷機とタンクの間に設置して実験を行 った.



Fig.2-2 Experimental flow without centrifuge



Fig.2-3 Experimental flow using a centrifuge

製氷機から供給される水溶液の温度が 0℃になった時間を 実験開始とし、120分間の運転を行い、タンク内の水溶液を 10 分毎に採取した. 遠心分離機を用いない場合, また表 2-1 に示す遠心分離機を用いた回転数別の実験は、それぞれ3回 行いその平均値にて評価した. ここで, 遠心分離機の回転数 N[rpm]から,

$$\alpha = \frac{a}{g} = 1.118RN^2 \times 10^{-3}$$

 $a : 遠心加速度[m/s^2]$

 $g : 重力加速度[m/s^2]$

 $R : 回転半径[m]$
(2.1)

を用いて,表 2-1 のように相対遠心加速度(Relative Centrifugal Force: RCF)α[G]を算出した. また, 重力加速度gは 9.80665[m/s²]とし,バスケットの半径は225mmであるため, 回転半径Rは0.225mとした.

1. 序論

1.1 研究背景

凍結濃縮法は、水溶液を冷却して溶媒である水を氷に相変 化させ、固液分離を行うことにより濃縮を行う方法である. 低温下で操作を行うため,機能性成分の劣化や微生物の繁殖 を防ぐことができる. 我々の研究では、スライリーアイスを 用いた凍結濃縮システムを採用し、固液分離の際に遠心分離 機のバスケット内部にスラリーアイスを投入し、バスケット の回転で生じる遠心力により分離を行う.しかし、このとき スラリーアイス内の氷粒子が融解し,濃縮効率が低下する課 題がある.

1.2 研究目的

本研究では、スラリーアイスを固液分離する際に用いる遠 心分離機の熱特性について着目した.本研究では,既存の遠 心分離機を用いて氷粒子融解について定量化を行う. さらに, 遠心分離機の氷粒子融解の抑制法を検討し,実験にて効果を 検証する.そして、氷粒子融解を抑制可能な遠心分離機の構 造を提案する.

2. バスケットの回転数による氷粒子融解の影響

2.1 実験目的

既存の遠心分離機を用いて固液分離を行う際に, 氷粒子が 融解する原因の一つにバスケットの回転数が考えられる.バ スケットの回転数が増加すると、バスケット内部に存在する 空気の熱伝達率が上昇する. そこで, バスケットの回転数に おける氷粒子融解量を実験的に調べ、検証するとともに、そ の他の支配因子についても明らかにする.

2.2 遠心分離機の概要

本実験で用いた遠心分離機(岩月機械製作所製, OKS-18)の 断面構造を図 2-1 に示す.本機は下部に駆動用モータが配置 されており、シャフトを介して上部のバスケットを回転させ る方式である.また、接液部については SUS304 を採用して いる. バスケットの内寸法は直径 450mm, 高さ 280 mmであ る. 遠心分離機の回転数は 10rpmから 1260rpmの範囲で任意 に設定が行える.



Fig.2-1 Centrifuge

Table2-1 Number of revolutions and Relative Centrifugal Force

Number of revolutions[rpm]	100	200	300	400	500
RCF[G]	2.52	10.1	22.6	40.2	62.9

採取した試料については,デジタル屈折計(ATAGO 製, RX-5000i-Plus)を用い屈折率を計測した.そして,先行研究⁽¹⁾より, 塩分濃度 1~4wt%において,屈折率n[-]と塩分濃度x[wt%]の 関係が求められている

$$x = \frac{n - 1.333}{0.001738} \tag{2.2}$$

を用いて,塩分濃度を算出した.

また、先行研究(2)の算出法である

$$IPF = 100\left(1 - \frac{x_0}{x_t}\right) \tag{2.3}$$

より,初期塩分濃度x₀[wt%],t時間後の塩分濃度x_t[wt%]を 用いて氷充填率(*Ice Packing Factor*: *IPF*)[wt%]を算出した.

2.4 実験結果

氷粒子の質量*m*_{ice}[kg]は,

$$m_{ice} = IPF\left(\frac{m_0 + a_0}{100}\right) \tag{2.4}$$

より算出し,遠心分離機を用いない場合と用いる場合の質量 の差を融解量 Δm_{icea} [kg]とした.よって,遠心分離機におけ る侵入熱Q[W]を,

$$Q = \frac{\Delta m_{icea}L}{7200} \tag{2.5}$$

から求めることができ,算出値を表 2-2 に示す.なお,融解 潜熱 $L = 333.6 \times 10^3 \text{ J/kg}$ とした.

RCF[G]	$m_{ice}[\mathrm{kg}]$	$\Delta m_{ice}[kg]$	f[%]	<i>Q</i> [W]
Without centrifuge	6.41			
2.52	3.65	2.77	43.16	128.26
10.1	1.44	4.98	77.60	230.62
22.6	0.260	6.15	95.95	284.55
40.2	0.168	6.25	97.38	287.59
62.9	0.154	6.26	97.60	287.60

 Table2-2
 Calculated values for ice particle melting

*IPF*の経時変化は図 2-4 に示すように*RCF*の増加に伴い, 勾配が大きくなる傾向となった.しかし, 22.6G以上になると 傾向の差異は見られなかった.



2.5 考察

バスケット内部に存在する空気および氷粒子の温度を表 2-3 に示す.なお,氷粒子の温度については回転状態で計測 することが困難であるため、タンク内のスライリーアイス温 度とした.また,熱流束q [W/m²]については、バスケット内 部の側面の面積 0.353m²,および表 2-2 に示す侵入熱Q[W]か ら求めた.これらの値を用いて、実験で行った各回転数にお ける熱伝達率h [W/(m²·K)]を図 2-5 に示す.熱伝達率は、回 転数が 300rpmを境界に挙動が異なる.回転数が 300rpm以下 では回転数の増加とともに線形的に上昇したが、300rpm以 上では差異が見られなかった.この傾向は、バスケットの回 転数が増加すると熱伝達率が高くなるという予想に反する. また、流動する気体の熱伝達率は、算出したバスケット内部 の空気の熱伝達率よりも低い12~120 W/(m²·K)と報告⁽³⁾さ れている.以上のことから、熱伝達率の他にも氷粒子が融解 する原因が存在すると考えられる.

また,120分間の運転後,遠心分離機を観察すると,壁面 に水滴がついており,高回転数になると水滴の量も増加した ことから,壁面からの侵入熱の影響が考えられる.

Table2-3 Air temperature in basket and Temperature of ice

particles							
Number of revolutions [rpm]	100	200	300	400	500		
Air temperature in basket [°C]	1.5	1.2	1.0	1.0	1.0		
Temperature of ice particles [°C]	-1.7	-1.6	-1.5	-1.5	-1.5		



3. 壁面からの侵入熱による氷粒子融解

3.1. 実験目的

遠心分離機の回転数におけるIPFの経時変化から,氷粒子 が融解する原因として,バスケット内部に存在する空気の熱 伝達率の他に遠心分離機の壁面からの侵入熱が考えられた. バスケットのRCFが増すにしたがい,遠心分離機内壁面に飛 散する水溶液の量が増加し,液膜流下方式で熱交換が行われ る.したがって,遠心分離機の外壁面に断熱材を取り付け, 氷融解量を実験的に調べた.

3.2. 実験方法

接液部に断熱材 (AEROFLEX, 厚さ 20 mm, 熱伝導率 0.036W/(m・K))を取り付けた遠心分離機を用いて, 第2章 の遠心分離機を用いる場合と同様の実験方法で, バスケットのRCFを 40.2,62.9Gとして行った.

3.3. 実験結果

氷粒子の質量m_{ice},氷粒子の融解量Δm_{ice},氷粒子の融解割

合f,侵入熱Qを,表3-1に示すように式(2.4),(2.5)より算 出した.断熱材を取り付けることにより,遠心分離機におけ る侵入熱は,40.2Gの場合は142.82W,62.9Gの場合は98.14W だけ減少し,図3-1に示すように*IPF*の上昇が見られた.

Table3-1	Calculated	values	for ice	particle	melting
1 40103-1	Calculated	varues	101 ICC	particle	menting

RCF[G]	m _{ice} [kg]	Δm_{ice} [kg]	f[%]	<i>Q</i> [W]
40.2	3.29	3.12	48.71	144.77
62.9	2.33	4.09	63.75	189.46



3.4. 考察

バスケット内部に投入されたスライリーアイスは、バスケ ットの回転により生じる遠心力により分離され、水溶液は内 壁面に飛散する.そのため、バスケットのRCFが増加すると、 水溶液の壁面の方向にはたらく力が大きくなるため、壁面に 飛散する量が増え、壁面に付着する位置が高くなると考えら れる.これにより、液膜が流下する距離が長くなり、伝熱面 積が増加するため、壁面からの侵入熱が増えた.以上のこと から、62.9Gの侵入熱の減少量は、40.2Gより小さくなったと 考えられる.また、第2章の実験後、遠心分離機を観察する と、遠心分離機の下部の壁面には水滴がついていなかったこ とから、モータによる侵入熱の影響も考えられる.

4. モータによる侵入熱が及ぼす氷粒子融解

4.1. 実験目的

氷粒子が融解する原因として,壁面からの侵入熱の他に駆動用モータによる侵入熱が考えられた.遠心分離機の下部に設置されているモータは、シャフトを介してバスケットを回転させており、バスケットの回転数が増すにしたがい発熱量が増加すると考えられる.したがって、接液部に断熱材を取り付けた遠心分離機のモータ設置部に送風を行い、氷融解量を実験的に調べた.

4.2. 実験方法

オイルフリースクロールコンプレッサ(ANEST IWATA 製, SLP-37C)を用いて,遠心分離機下部の側面の穴(高さ 30mm, 幅 30mm)に固定したノズル(直径 5 mm, チューブ)から流 量 51L/minで送風し,第3章と同様の方法で実験を行った.

4.3. 実験結果

氷粒子の質量 m_{ice} ,氷粒子の融解量 Δm_{ice} ,氷粒子の融解割 合f,侵入熱Qを,表4-1に示すように式(2.4),(2.5)より算 出した.遠心分離機のモータ設置部に送風を行うことにより, 遠心分離機における侵入熱は減少し,IPFの経時変化は図4-1に示すように第3章の実験結果より高く推移した.

TT 1 1 4 1	C 1 1 /	1 1	c •		1
	Coloniate	1 WOLLOG 1	tor 100	norticlo	malting
1 40054-1			101 10.6	DALITUE	: INCHINY
14010.1	Careararee			partiere	

RCF[G]	$m_{ice}[\mathrm{kg}]$	$\Delta m_{ice}[kg]$	f[%]	<i>Q</i> [W]
40.2	4.18	2.24	34.86	103.59
62.9	3.45	2.96	46.22	137.37



4.4. 考察

バスケットを回転させる際にモータは熱を発するが、本実 験で用いた遠心分離機の下部は側面に高さ、幅30mmの穴が 3個しかなく、遠心分離機外へ熱を放出しづらい構造であた っため、発された熱はモータ設置部にとどまり、モータ設置 部に存在する空気の温度を上昇させたと考えられる.これに より、製氷機へ送液される濃縮液の温度が上昇し、製氷機で 生成される氷粒子の量が減少した.

5. 結言

本研究では,既存の遠心分離機を用いて氷粒子融解の定量 化を図った.さらに,遠心分離機の氷粒子融解の抑制法を検 討し,実験にて効果を検証した.

*IPF*の経時変化は、遠心分離機を用いない場合が最も高く 推移し、遠心分離機を用いる場合では高回転数になるにした がい勾配が小さくなる傾向となり、22.6G以上になると傾向 の差異が見られなかった.このことから、氷粒子が融解する 原因の一つが熱伝達率であることが確かめられた.また、実 験後の遠心分離機の壁面に水滴がついていたことから、壁面 からの侵入熱の影響も考えられた.そこで、遠心分離機の接 液部に断熱材を取り付け、40.2,62.9Gで実験を行ったところ、 *IPF*は上昇し、遠心分離機における侵入熱は減少した.さら に、遠心分離機下部の壁面には水滴がついていなかったこと から、モータによる侵入熱の影響も考えられた.そこで、断 熱材を取り付けた遠心分離機のモータ設置部に送風を行い、 40.2,62.9Gで実験を行ったところ、*IPF*はさらに高く推移した.

以上のことから,既存の遠心分離機の氷粒子融解の原因が 明らかになった.さらに,氷粒子融解の抑制方法の効果の実 験的検証を行えた.

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 方法の研究評価, 高知工科大学大学院工学研究科基礎工 学専攻知能機械システム工学コース修士論文(2019), pp.4-5
- (2)塩見理乃,スクロースとNaClの2成分水溶液における 氷膜熱伝導率の評価,高知工科大学システム工学群知能 機械工学専攻卒業論文(2023), p.10
- (3)日本冷凍空調学会編,初級標準テキスト 冷凍空調技術, 第4次改訂版(2015), p.45,日本冷凍空調学会