

卒業論文要旨

遠心分離機を用いた氷粒子分離における融解抑制操作の検討

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1250073 小林 遼河

1. 序論

1.1 研究背景

濃縮は、溶媒の一部を除去し、溶質の割合を高める操作で、食品の水分活性を低下させることで、微生物の繁殖を抑え、品質の維持や保存期間の延長が可能となる⁽¹⁾。そのため、食品分野における保存性の向上に寄与し、体積の減少により、貯蔵や輸送コストの削減にも貢献する。濃縮操作の一つである凍結濃縮に用いられる遠心分離は、遠心力を利用して固液を効率的に分離する方法であり、操作が容易で濃縮液を回収しやすい。しかし、氷粒子の融解といった課題がある。図1に研究グループで用いている凍結濃縮システムを示す。本システムでは、水を氷として析出させ、分離することで濃縮を行う。低温下での操作により、高品質な濃縮液が得られる。

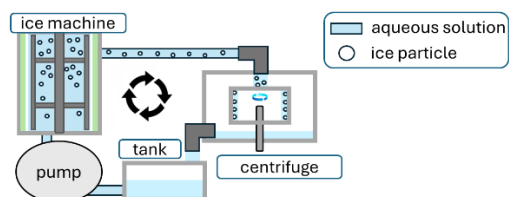


Fig1 Flow of freeze concentration

1.2 研究目的

我々の研究グループで用いている凍結濃縮システムでは、遠心分離の過程において氷粒子が融解する。このことから、凍結濃縮の濃縮効率が低下するといった課題が生じている。そこで、本研究では、凍結濃縮において遠心分離機を用いたスラリーアイスの固液分離時に発生する熱の影響に着目した。遠心分離機における氷粒子の融解抑制方法を検討し、その効果を実験的に検証する。また、氷粒子融解量を定量的に評価することを目的とする。

2. 断熱材の有無での遠心分離機による氷粒子融解の影響

2.1 実験目的

本研究では、遠心分離機によるスラリーアイスの氷粒子融解量を、凍結濃縮システムを用いて実験的に明らかにする。さらに、定量的評価を行い、氷粒子融解の抑制法を検討することを目的とする。

2.2 実験方法

遠心分離機（岩月機械製作所製、OKS-18）を用いて凍結濃縮システムでの性能評価を行った。接液部は、SUS304 製となり、バスケットの内寸法は直径 450mm、高さ 28mmで、 $10\sim1260\text{min}^{-1}$ まで無段階調整が可能である。実験条件を表1に示す。120 分間実験を行い、10 分毎に水溶液を採取し、塩分濃度を測定した。そして、塩分濃度から氷粒子の質量 $m_{ice}[\text{kg}]$ 、氷粒子の融解量 $\Delta m_{ice} [\text{kg}]$ 、氷粒子の融解割合 $f[\%]$ 、

および遠心分離機における侵入熱 $Q[\text{W}]$ を算出した。いずれの相対加速度においても 3 回実験を行い、平均値を用いて評価した。

Table.1 Experimental conditions

Aqueous solution	
Aqueous solution	Salt water
Volume of the solvent [L]	40
Initial salinity [wt%]	2
Measurement conditions	
Experiment time [min]	120
Sampling period [min]	10
Ambient temperature [°C]	25
Centrifuge	
Relative centrifugal acceleration [G]	2.52, 10.1, 22.6, 40.2, 62.9

2.3 実験結果

遠心分離機有無の結果を表2に示す。遠心分離機の使用により氷粒子の融解が発生し、相対遠心加速度の増加とともにその影響が顕著になった。融解率は 2.52 Gで 80.1%、10.1 Gで 95.9%、22.6 Gで 98.6%に達し、22.6 G以上では氷粒子の観測が困難となり、実験が不可能となった。

Table.2 Calculated value without insulation

Relative centrifugal acceleration [G]	Mass [kg]	Amount of melting[kg]	Melting rate[%]	heat of penetration[W]
Without centrifuge	8.44			
2.52	1.68	6.75	80.1	313
10.1	0.35	8.09	95.9	375
22.6	0.12	8.32	98.6	386

2.4 考察

氷粒子の融解要因として、遠心分離機外部の空気による熱伝導が考えられる。SUS304 ステンレス鋼の高い熱伝導率 ($16.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) により、周囲の空気から伝導伝熱で内部に熱が侵入し、分離機内部の空気が温められることで氷粒子の融解が促進される可能性がある。したがって、雰囲気空気からの熱侵入を防ぐ対策が必要である。

相対加速度の増加に伴う融解の要因として、遠心分離機の下部に設置されているモータの発熱が関係していると考えられる。インバータ制御のモータにおける主な発熱要因に、鉄損と銅損があげられる。鉄損は、ロータの鉄芯に生じる損失で、鉄芯が磁化と消磁を繰り返す際に、磁区の反転によってエネルギーが熱として失われるヒステリシス損と、鉄芯内部で変化する磁場によって誘導される渦状の電流が発生し、

その電流によるジュール熱としてエネルギーが失われる渦電流損から構成される。一方、銅損は、巻線に流れる電流によって発生するジュール損失である。特に、高周波成分の影響により鉄損が増加し、モータの発熱が増加する傾向がある(2)。

3. 断熱材の有無での遠心分離機による氷粒子融解の影響
3.1 実験目的

既存の遠心分離機における侵入熱による氷粒子の融解現象を抑制するため、遠心分離機に断熱材を取り付け、その効果の評価を行う。

3.2 実験結果

実験は第2章と同様のフロー、条件で行った。分離機に断熱材(AEROFLEX 製)を二重に取り付けた。実験方法で示した算出値について、断熱材ありの結果を表3に示す。断熱材を取り付けた場合、相対加速度が最小の2.52Gにおける氷粒子の融解割合は23.8%となり、侵入熱は93.1Wと算出された。これは、断熱材を取り付けない場合の約1/3に相当する。10.1Gでは、氷粒子の融解割合は40.9%となり、侵入熱は160Wと算出され、断熱材を取り付けない場合の約1/2に程度になった。22.6Gでは、氷粒子の融解割合は63.1%となり、侵入熱は246Wと算出され、断熱材を取り付けない場合の約3/5に程度になった。これによって、断熱材を取り付けた場合も、侵入熱および氷粒子の融解量は相対遠心加速度とともに増加する傾向が確認された。

Table.3 Calculated value with insulation installed				
Relative centrifugal acceleration [G]	Mass [kg]	Amount of melting[kg]	Melting rate[%]	heat of penetration[W]
Without centrifuge	8.44			
2.52	6.43	2.01	23.8	93.1
10.1	4.98	3.45	40.9	160
22.6	3.12	5.32	63.1	246
40.2	2.21	6.23	73.8	289
62.9	2.11	6.32	74.9	293

3.3 考察

断熱材の有無で比較すると、断熱材による氷粒子の融解抑制の効果を確認できたが、断熱材を使用した場合と、遠心分離機を使用しない場合とを比較すると十分な効果とはいえない。これは、断熱材によって侵入熱を完全には防止されていないといえる。

遠心分離機は、モータを設置する下部の空間とバスケットを配置する上部の空間の二つで構成されている。下部空間には、ケーブルを通すための開口部しかなく、モータからの熱の放出が不十分である。そのため、運転中に発生した熱が蓄積し、温度上昇を考えると考えられる。また、バスケット配置空間では、空気の流れ経路が限られ、下部で発生した熱が上部へ侵入する可能性がある。このため、下部からの侵入熱を定量的に評価し、その抑制方法を検討する必要がある。

4. 軸部からの侵入熱の影響

4.1 実験目的

氷粒子の融解は、底面の軸用の穴からのモータの侵入熱が原因と考えられた。バスケットの回転数が増加するとモータの発熱も増加するため、軸用の穴を塞ぐ対策を実施し、穴を塞ぐパーツを製作・設置し、氷の融解量を実験的に調べた。

4.3 実験結果

実験は第2章と同様のフロー、条件で行った。3章と同様の断熱材と軸部に断熱材を追加した。軸部に断熱材を追加した場合の結果を表4に示す。軸部に断熱材を追加した場合の融解割合は、追加しない場合と比較して、10.1G以上の相対加速度において小さくなった。また、軸部に断熱材を取り付けた遠心分離機の侵入熱も同様に、10.1G以上の相対加速度で減少した。さらに、40.2Gから62.5Gの間で侵入熱が70.8W増加しており、これは最も大きな侵入熱の変化であった。

Table.4 Calculated value if there is insulation in the shaft section

Relative centrifugal acceleration [G]	Mass [kg]	Amount of melting[kg]	Melting rate[%]	heat of penetration[W]
Without centrifuge	8.44			
2.52	6.31	2.13	25.2	98.7
10.1	5.47	2.96	35.1	137
22.6	5.22	3.22	38.1	149
40.2	4.91	3.53	41.8	163
62.9	3.38	5.05	59.9	234

4.4 考察

実験にて、軸部の隙間を塞ぐことで遠心分離機下部からの侵入熱が抑制され、氷粒子の融解が軽減されることが確認された。密閉されたモータの設置空間内でモータの熱が蓄積されることで、その空間内の温度が上昇し、軸用の穴を通じて熱が上部へ移動していたと考えられる。そのため、この穴を塞ぐことで熱の侵入が抑制され、氷粒子の融解が抑制されたと考えられる。また、軸部の断熱材の有無による侵入熱の差は、相対加速度の増加に伴い大きくなっており、特に高相対加速度においてその抑制効果が顕著であることが確認された。これらの結果から、軸部の断熱材は氷粒子の融解抑制に有効な対策であることが示された。

5. 結論

遠心分離機による氷粒子の融解要因として、雰囲気空気との伝導伝熱やモータの発熱による内部温度上昇が挙げられた。対策として、遠心分離機全体に断熱材を装着し、軸部の隙間を塞ぐことで侵入熱を抑制した結果、氷粒子の融解割合が大幅に低減した。しかし、依然として約35%の熱侵入が残り、モータの発熱が軸を通じて伝導伝熱し、バスケットの温度上昇を引き起こしている可能性が示された。このことから、氷粒子の融解抑制には、外部からの熱侵入対策に加え、モータ周辺の熱管理が重要であることが明らかとなった。今後、断熱材の選定や軸部の密閉性向上、モータの熱伝導抑制など、さらなる最適な熱管理手法の検討が求められる。

参考文献

(1) 松野隆一, 中村厚三, 古田武, 多門肇, 濃縮と乾燥, 光琳(1989), pp.1-5
(2) 森本雅之, モータの熱対策, エヌ・ディー・エス(2022), pp.3-8