

凍結濃縮システム製氷部にて生成される氷粒子径の評価

ものづくり先端技術研究室 1170029 岡林 憲哉

1. 緒論

凍結濃縮法は、溶液中の水を氷として析出させ、この氷を取り除くことで濃縮を行う方法である。低温で濃縮を行うため、果汁などの液状食品では熱による有用成分や芳香成分の損失が少なく、高品質な濃縮液を得ることができる。本研究の凍結濃縮システムでは製氷部にて、液体中の水が、二重円筒間の冷媒によって内円筒内壁面に氷膜として形成し、これを掻き取り刃で削り取ることで、溶液中に氷粒子が懸濁したスラリーアイスとなる。この氷粒子を遠心分離機により分離除去することで濃縮を行う。しかし、製氷段階にて生成される氷粒子径の操作方法についての研究はほとんど見られず、本研究で目指す製氷部と遠心分離部で構成される凍結濃縮法における最適な製氷条件が決定できていない。そこで、製氷部にて生成される氷粒子径の測定方法を確立し、氷粒子径の粒度分布を定量的に調べ、氷粒子径のコントロールに影響する因子の解明を目的とした。

2. 実験方法

本実験フローを図1に示す。タンクからポンプを用いて果汁に見立てたスクロース水溶液を製氷部と粒度分布測定装置間で循環することで製氷を行う。このとき生成された氷粒子の一部を1度チラーの循環を停止することで融解させ、その後再度製氷を行うことで氷粒子を生成し、粒度分布測定を行う。これは過冷却開放によって氷粒子が管内全体で発生することによる詰まりを解消するためと、凝固点にて氷が発生したときの粒子径を調べなければならないので過冷却で発生した氷の影響を除くためである。実験条件を表1に示す。

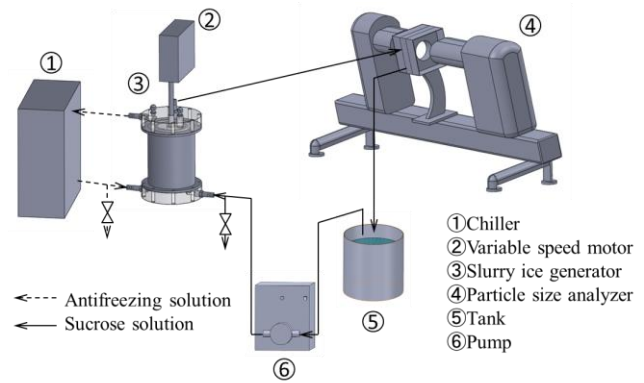


Fig. 1 Experimental equipment and solution flow

Table 1 Experiment condition

Ambient temperature[°C]	15
Solute	Sucrose
Concentration of sucrose solution [°Brix]	10,15,20,25,30,35
Rotational Reynolds number	2000,3000,4000,5000,6000
Temperature of Antifreezing solution [°C]	-10

3. 実験結果と考察

製氷部内での攪拌レイノルズ数の変化による影響を詳細にみるため、 $Re_r=3000, 4000, 5000, 6000$ の粒度分布を、攪拌状態の影響がもっとも少ない $Re_r=2000$ の粒度分布と比較した。図2~5に示すように、 10°Brix では $Re_r=3000, 4000, 5000$ において粒子径の大きい方に粒度分布がみられるものの、 $Re_r=6000$ との比較では粒子径の小さい方に粒度分布がある。本結果は、全てのスクロース水溶液の濃度 ($10\sim35^{\circ}\text{Brix}$) においても同様の傾向であった。

そこで、粒度分布の比較をさらに詳細にみるため、攪拌レイノルズ数における粒度分布の個数頻度[%]から、基準とした $Re_r=2000$ の各粒子径における個数頻度の差分をとった。なお、本図において、個数頻度の差分がプラスの粒子径は $Re_r=2000$ と比較したときの粒子個数の増加を表し、マイナスの粒子径は減少となる。 10°Brix においては、図6に示すように、粒子径が $50\mu\text{m}$ 付近を境界に、 $Re_r=3000, 4000, 5000$ にて粒子径の小さい氷粒子が減少し、粒子径の大きい氷粒子が増加している。このとき、 $Re_r=4000$ の傾向が最も顕著に表れた。しかし、 $Re_r=6000$ においては、粒子径の小さい氷粒子が増加し、粒子径の大きい氷粒子が減少している。しかし、スクロース水溶液の濃度が高くなると、 $50\mu\text{m}$ を境界にして攪拌レイノルズ数の増加とともに、粒子径の小さい領域はより多く、粒子径の大きい領域はより少なくなる傾向を得た。

攪拌レイノルズ数が低いときにみられる粒子径の小さい氷粒子が減少し、粒子径の大きい氷粒子が増加している原因としては、オストワルド・ライプニングにより小さい氷粒子が融解し、大きい氷粒子が成長したためと考えられる。一方で、攪拌レイノルズ数が高くなるに従い粒子径の小さい氷粒子が増加し、粒子径の大きい氷粒子が減少している原因は、2次核発生によって小さい氷粒子が生成されているからと考えられる。攪拌レイノルズ数が高くなることにより氷粒子の機械的衝撃頻度が増加し、コンタクトニュークリエーションによる2次核発生が氷粒子の粒度分布に影響を及ぼしていると考えられる^[1]。

以上のことから、本研究装置では、攪拌レイノルズ数の範囲により、オストワルド・ライプニングと2次核発生との2つの現象が氷粒子径に影響を及ぼしていると考えられる。遠心分離機における効率を上げるため、氷粒子径を増大させるには、オストワルド・ライプニングの効果が最も大きい $Re_r=4000$ での製氷が有効である。

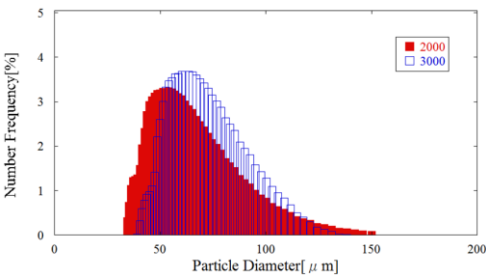


Fig. 2 Compare particle size distribution of $Re_r=2000$ and $Re_r=3000$ (at 10°Brix)

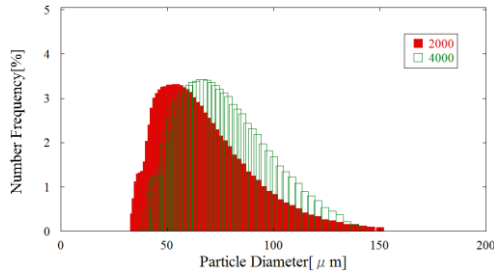


Fig. 3 Compare particle size distribution of $Re_t=2000$ and $Re_t=4000$ (at 10°Brix)

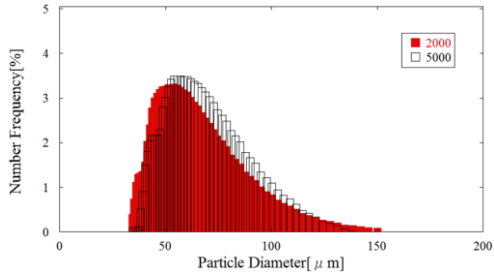


Fig. 4 Compare particle size distribution of $Re_t=2000$ and $Re_t=5000$ (at 10°Brix)

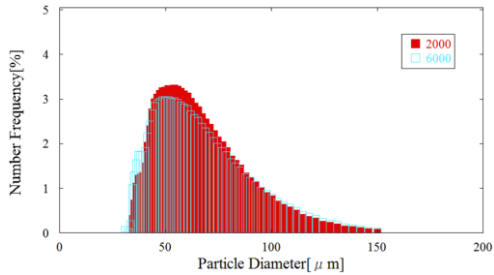


Fig. 5 Compare particle size distribution of $Re_t=2000$ and $Re_t=6000$ (at 10°Brix)

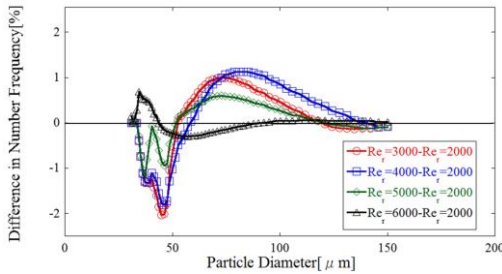


Fig. 6 Difference in Number Frequency relative to the particle size distribution (at 10°Brix)

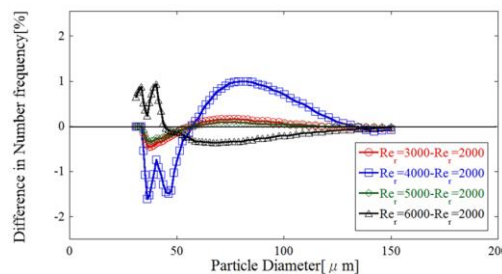


Fig. 7 Difference in Number Frequency relative to the particle size distribution (at 15°Brix)

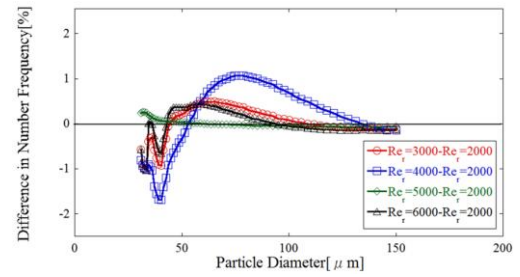


Fig. 8 Difference in Number Frequency relative to the particle size distribution (at 20°Brix)

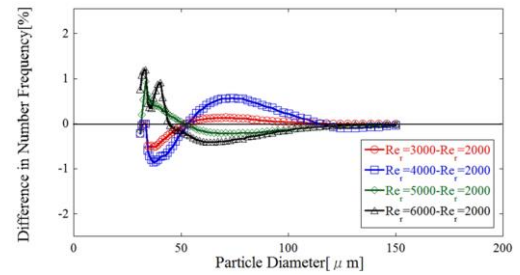


Fig. 9 Difference in Number Frequency relative to the particle size distribution (at 25°Brix)

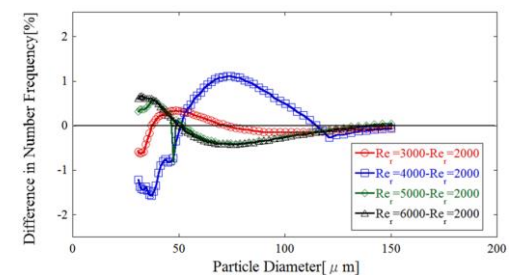


Fig. 10 Difference in Number Frequency relative to the particle size distribution (at 30°Brix)

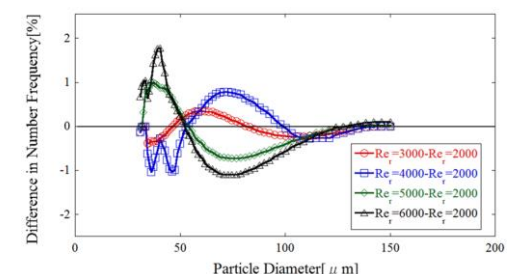


Fig. 11 Difference in Number Frequency relative to the particle size distribution (at 35°Brix)

4. 結論

本研究では凍結濃縮法によって生成される氷粒子の粒度分布の測定を行うことで、氷粒子径に与える影響因子の解明を行った。小型スラリーアイス生成装置を用いてスクロース水溶液濃度と製氷部内の攪拌レイノルズ数の変化における氷粒子径の測定を行った。製氷部内の攪拌レイノルズ数によるオストワルド・ライプニングと2次核発生を考慮することで、氷粒子径はコントロールすることが可能になるとの見通しが得られた。これにより、遠心分離機での効率性に寄与できると考えられる。

参考文献

[1]久保田徳昭, “溶液晶析における2次核発生と結晶成長”, 1993