

凍結濃縮システムにおける氷膜性状に関する研究

ものづくり先端技術研究室 1170106 中田功一郎

1. 緒言

凍結濃縮法は液状食品を冷却することにより、液中の水分を凝固させ、これを分離することにより濃縮を行う方法である。他の濃縮法と比較して、低温、常圧での操作のため、成分の変質、揮発性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。本研究は、スラリーアイス生成装置を用いた凍結濃縮装置の開発を目的としている。スラリーアイスは、水溶液と微小な氷粒子の懸濁液のことであり、製氷部の伝熱面に氷膜を発生させ、それを掻き取り刃で切削することにより生成する。しかし、水溶液における製氷速度、及び氷膜の性状に関して不明な点が多く、製氷能力の推定や、安定な運転条件の設定、装置をスケールアップの際の設計条件の設定が困難であるといった課題がある。本報告では、スターリングクーラーを用いた開放系の製氷装置を作成し、スクロース水溶液において製氷実験を行った。そして、スクロース水溶液における氷膜の熱伝導率、及び氷膜中のスクロース水溶液の含有率を考察した。

2. 実験装置及び方法

図1に実験装置の概略を示す。スターリングクーラー(ツインバード製, SC-UD08)に SUS304 製カップを取り付け、製氷の様子を赤外線サーモグラフィ(Testo 製, testo885-2)にて計測を行う。スターリングクーラーは、温調器(オムロン製, E5CC-CX2ASM-006)を用いてカップ伝熱面温度の制御を行った。熱電対は、表面温度センサー(アズワン製, MF-SP-T)をカップ伝熱面とスターリングクーラー吸熱部に、T型熱電対(CHINO 製, SCHS1-0)は、水温と雰囲気温度を測定するため、カップ内と外に設置した。

実験方法は、製氷カップと水温を一様化するため、スターリングクーラーを作動し、設定温度(-10℃, -15℃, -20℃)まで予冷した。その後、スターリングクーラーの運転を停止させ、カップに市水、及びスクロース水溶液(10,20,30,40°Brix)を 500ml 投入した。カップの余熱により生成された氷が十分に融解したのを確認した後、再度スターリングクーラーを作動し、製氷を開始した。製氷開始と同時に、赤外線サーモグラフィ、データロガー(キーエンス製, NR-500, TH-08)による計測及び記録を開始した。サンプリング周期はそれぞれ 10 秒とし、1条件につきそれぞれ 3 回ずつ実験を行った。これらの実験はすべて 5℃に設定した恒温室内で行った。

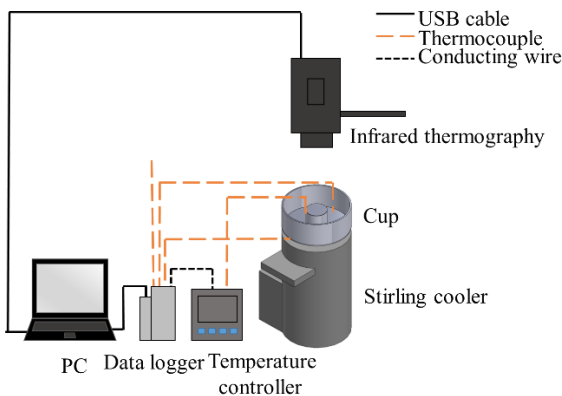


Fig.1 Schematic of experimental equipment

3. 実験結果及び考察

各伝熱面温度における時間と氷膜厚さの関係を図2に示す。氷膜が形成された 300 秒以降において、 $y = a \ln(x) + b$ の形式で対数回帰曲線を求めた。全体的な傾向として、濃度が上昇するに従い、氷膜厚さの減少が見られる。また、伝熱面温度の低下に伴い、各スクロース水溶液において、勾配が大きくなっているのが確認できる。このことから、伝熱面温度を下げることで、製氷速度が早くなっていることが分かる。

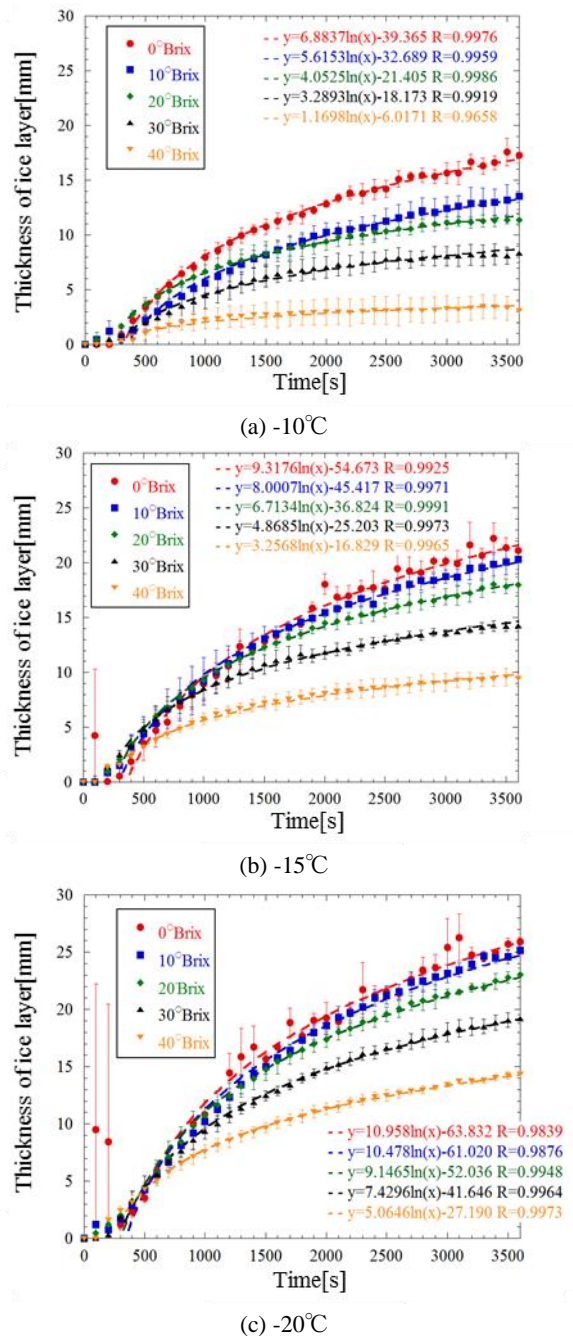


Fig.2 Relation between time and thickness of ice layer

界面での熱移動は氷層の熱伝導のみに支配されるとした場合、氷の潜熱量と氷層内の伝熱量の熱収支式より、

$$\frac{\rho L \pi (r_2^2 - r_1^2) l}{\tau} = \frac{2 \pi \lambda l (T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1)$$

が成り立つ。ここで ρ は氷の密度[kg/m³]、 L は氷の潜熱量[kJ/kg]、 r_1 は製氷器中心から伝熱面までの距離[m]、 r_2 は製氷器中心から氷層までの距離[m]、 T_1 は伝熱面温度[°C]、 T_2 は凍結界面温度[°C]、 λ は氷の熱伝導率[W/m·K]、 l は伝熱面高さ[m]、 τ は時間[s]をである。左辺を Q としておき、式変形すると、

$$\lambda = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \pi l (T_2 - T_1)} \quad (2)$$

となる。式(2)と実験値との誤差を補正係数 $K=1.38$ を用いて、氷膜の熱伝導率を導出した。図3に伝熱面温度別に平均値を取った熱伝導率と濃度の関係を示す。何れの伝熱面温度においても、濃度上昇とともに熱伝導率の低下の傾向が見られる。

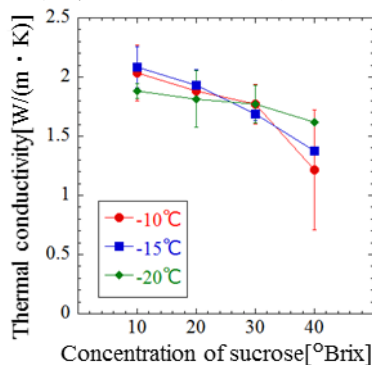


Fig.3 Relation between concentration and thermal conductivity of ice layer

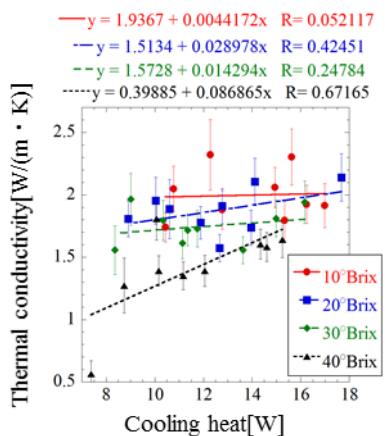


Fig.4 Relation between cooling heat and thermal conductivity of ice layer

また 10~30°Brix の範囲では、各濃度での熱伝導率に大きな変化が見られないが、40°Brix では、伝熱面温度が低い方から熱伝導率が大きくなる傾向があった。このことより、40°Brix においては、伝熱面温度を低く設定することで、熱伝導率の低下を抑えることが可能であると推測できる。また、伝熱面温度-10°Cでは、図2(a)より、40°Brix では氷膜厚さに誤差があり、導出した熱伝導率に大きく誤差が生じた。

冷凍能力と熱伝導率の関係を図4に示す。10~30°Brix と40°Brix の線形回帰線を比較すると、10~30°Brix においては、冷凍能力の変化に対し熱伝導率の相関はほぼ見られないが、40°Brix では、冷凍能力の上昇に伴い、熱伝導率が上昇する傾向が確認できる。

今回の実験において、氷層の熱伝導率の低下は、構成的過冷却と呼ばれる過冷却現象が起り、針状の氷の間にスクロース水溶液が入り込むことにより生じたと考えられる。そこで今回の実験において、図5のように氷膜をモデル化し、氷層中のスクロース水溶液の含有量を導出した。このときスクロース水溶液において対流が起こらないものとし、熱伝導が支配的であるとす。伝熱面高さを l とし、伝熱面に氷が l_i 、スクロース水溶液が l_{sc} 接しているとする。また、このとき、 $l_i + l_{sc} = l$ である。

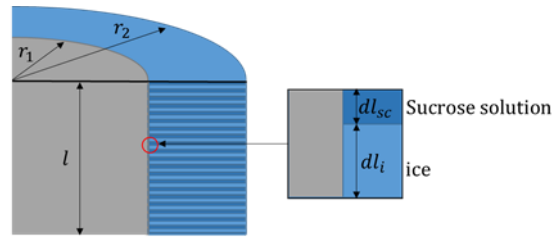


Fig.5 Model of ice layer in sucrose solution

熱収支式より、氷層中のスクロース水溶液の含有率は

$$\frac{l_{sc}}{l} = \frac{\lambda_{ex} - \lambda_i}{\lambda_{sc} - \lambda_i} \quad (3)$$

λ_{ex} 、 λ_i 、 λ_{sc} は、それぞれ実験により得られたスクロース水溶液の氷層、純粋より生成された氷、スクロース水溶液の熱伝導率である。濃度とスクロース水溶液の含有率の関係を図6に示す。何れの伝熱面温度においても濃度の上昇に伴い、スクロース水溶液の含有率が増加していることが分かる。また、伝熱面温度が-20°Cの

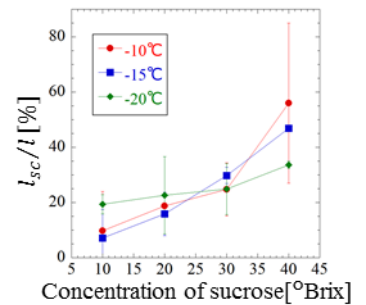


Fig.6 Relation between concentration and percentage of sucrose solution in the ice layer

10~20°Brix の範囲では、他の伝熱面温度設定値よりもスクロース水溶液の含有率が多くなった。図2より、10~20°Brix スクロース水溶液の製氷において、伝熱面温度が-20°Cでは、他の設定温度よりも勾配が大きく、製氷速度が速いことが確認できる。これにより氷中にスクロース水溶液が多く取り込まれ、スクロース水溶液の含有率が大きくなったのではないかと考えられる。また、設定温度-10°Cの際には、図3と同様に、40°Brix において大きな誤差が見られた。設定温度、製氷速度とスクロース水溶液の影響を明らかにするために、今後更なるデータの蓄積、また他の設定温度での実験を行う必要がある。

4. 結言

本研究では開放系製氷器によるスクロース水溶液の製氷実験を行った。スクロース水溶液の濃度上昇に伴い、凍結界面の進行が遅くなる傾向を示した。また、実験値より生成された氷層の熱伝導率を求めると、伝熱面温度と冷凍能力から40°Brix では、伝熱面温度が低く、冷凍能力が高いとき、熱伝導率が高くなる傾向を示した。また、導出した熱伝導率より氷層中のスクロース水溶液の含有率を求めたところ、各伝熱面温度にて濃度上昇とともに、スクロース水溶液の含有率が多くなる傾向を示した。しかし、10,20°Brix においては伝熱面温度-20°Cのときに、他の設定温度よりも含有率が多くなった。これは製氷速度が他の設定温度よりも速いため、氷層に多くのスクロース水溶液が取り込まれたためではないかと考えられる。課題としてデータにばらつきがあるため、今後はデータの蓄積方法の再考、また、他の設定温度や水溶液濃度においても実験を行い、製氷速度及び熱伝導率の関係性について明らかにする必要がある。

参考文献

- 1)松野隆一・中村厚三・古田武・田門肇(1989). 濃縮と乾燥,矢野俊正・桐栄良三監修,光琳,13-17
- 2)福迫尚一郎・稲葉英男(1996). 低温環境下の伝熱現象とその応用,養賢堂 336-351