

伝熱面に形成されるスクロース水溶液の

攪拌状態における氷層物性値に関する研究

Study on the Properties of Ice Layer on Heat Transfer Surface in Sucrose Solution Stirred

知能機械システム工学コース

ものづくり先端技術研究室 1215021 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(H₂O)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⁽¹⁾。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構築を目的としている。スラリーアイスは、水溶液と微小な氷粒子が混在した懸濁液のことであり、製氷部の伝熱面に氷膜を発生させ、その氷膜上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する際の設計条件の設定が困難であるといった課題がある。本報告では二重円筒型製氷器とサーモチラーを用いた実験装置を製作し、スクロース水溶液を用いた氷層特性を調べるため、製氷条件による氷層の熱伝導率の検証も行った。

2. 実験装置及び方法

装置の概略を図1に示す。製氷器は、外筒がPVC製、内筒がSUS316製の二重円筒製氷器と、サーモチラー(SMC製、HRSH090-AN-20,HRZ002-L1-DY)より構成されている。二重円筒内に、-10℃、-15℃に設定した不凍液(60%エチレングリコール水溶液)を循環させることにより、内筒にて水溶液の冷却を行う。伝熱面には、熱流センサ(日置電機社製、Z2012)と表面温度センサ(東亜電器製、MF-O-T)を設置しており、伝熱面の熱流束、伝熱面温度の計測を行う。溶液サンプルとして、10,20,30°Brixのスクロース(ナカライテスク製、Code30403-84)水溶液を使用し、攪拌レイノルズ数 $Re_r=0,2000,3000,4000,5000,6000$ の条件で攪拌機(IKA製、EUROSTAR20)にて流動化させながら10分間製氷を行う。また、実験前後の濃度をデジタル屈折計(ATAGO製、AXA10002)にて計測を行った。

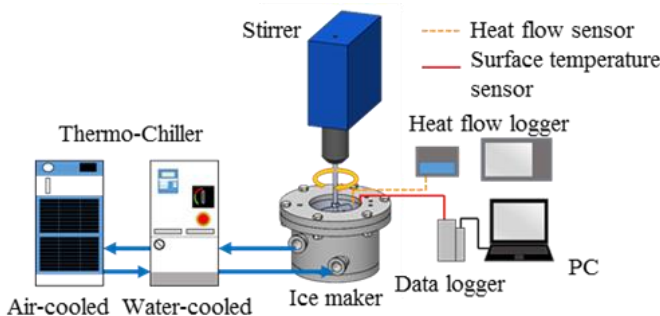


Fig. 1 Schematic of experimental equipment

3. 熱伝導率の導出

氷層熱伝導モデルを図2に示す。 r_1 [m], r_2 [m]は、それぞれ中心から氷層表面までの距離を、 T_{ice} [°C], T_w [°C]は、それぞれ氷層表面温度、伝熱面温度を示す。 T_{ice} は、スクロース水溶液の凝固点の計測値より得られた、濃度 C [°Brix]に対する近似曲線(式(1))より算出を行った。

$$T_{ice} = -0.0018368C^2 - 0.041209C - 0.016053 \quad (1)$$

伝熱量 Q [W]を求める。熱流束センサより得られた熱流束 q [W/m²]から

$$Q = 2\pi r_1 l q \quad (2)$$

となる。ここで l [m]は伝熱面高さを示す。実験値により得られる氷層の熱伝導率を λ_{ex} [W/(m·K)]として、氷層内の熱移動を定常熱伝導であると仮定すると

$$Q = \frac{2\pi\lambda_{ex}\Delta T}{\ln\frac{r_1}{r_2}} \quad (3)$$

ここで、 ΔT は、

$$\Delta T = T_{ice} - T_w \quad (4)$$

とする。式(3)を式変形すると

$$\lambda_{ex} = \frac{Q \ln\frac{r_1}{r_2}}{2\pi l \Delta T} \quad (5)$$

となり、氷層の熱伝導率を算出することができる。

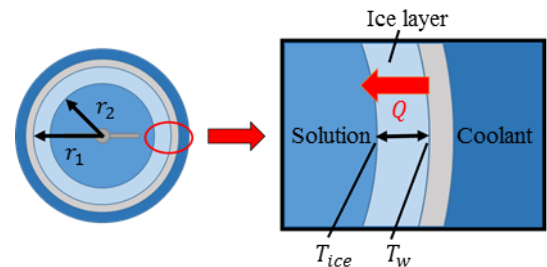


Fig. 2 Heat conduction model of ice layer

4. 実験結果及び考察

各条件におけるスクロース水溶液の氷層熱伝導率を図3に示す。攪拌状態($Re_r=2000\sim 6000$)を静止状態($Re_r=0$)と比較すると、すべての条件において、熱伝導率が増加する傾向が見られる。これは、氷の成長に伴い、凍結界面近傍に溶質成分が排出され、高濃度溶液が滞留することで、多くの溶質成分を取り込み、氷の成長が妨げられたためであると考えられる。攪拌状態においては、伝熱面近傍の濃度分布が小さくなることで、より溶質成分の含有を抑えることができ、氷層中の氷の割合が増すことで、熱伝導率が増加したと考えられる。

静止状態を除く攪拌状態において、熱伝導率とレイノルズ

数に大きな相関は見られず、熱伝導率は濃度による影響が強いと言える。不凍液温度に関しては、10°Brixを除いて、不凍液温度が低温の場合に熱伝導率が増加する傾向が見られた。この原因としては、不凍液とスクロース水溶液温度との差が大きくなることで伝熱量が増加し、より多くの氷が生成されたためであると考えられる。また、10°Brixでは、不凍液の温度を低温にしても、熱伝導率にほとんど差異が見られなかった。これは、10°Brixにおいて、不凍液温度が低温になると、先ほどとは逆に、製氷のための伝熱量が増加したため、製氷速度が早く、より多くの溶質を取り込みながら成長したと考えられる。

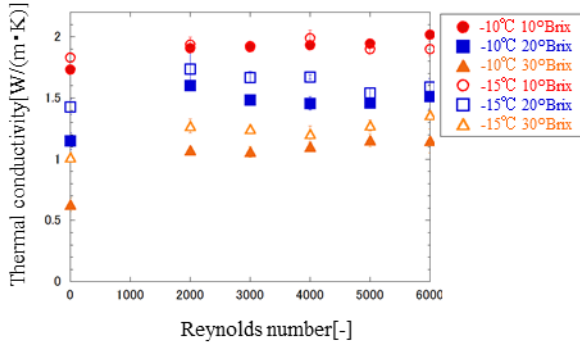


Fig. 3 Thermal conductivity of ice layer

実験開始から 300 秒ほど経過すると、伝熱面に氷層が形成され、伝熱量は非常に緩やかに低下する。このことから氷層の厚みが一定体積で増加すると仮定し、熱伝導率の時間変化を導出する。

まず、氷層の体積 $V[\text{m}^3]$ が一定体積で増加すると、単位時間あたりの体積 $v[\text{m}^3/\text{s}]$ は、

$$v = V/t_1 \quad (6)$$

となる。ここで t_1 は実験終了時間とし、 $t_1=600$ である。

次に、中心から氷層までの距離 r_2 の時間変化を求める。製氷時間を $t[\text{s}]$ として、時間経過とともに生成される氷の体積 $vt[\text{m}^3]$ は、

$$vt = (r_1^2 - r_2^2)\pi l \quad (7)$$

であるため、

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 - \frac{vt}{\pi l}} \quad (8)$$

となる。これより、 r_2 の時間変化を求めることができる。また、濃度 C が一定の速度で上昇すると仮定し、

$$C = C_0 + \frac{(C_1 - C_0)}{t_1}t \quad (9)$$

とする。ここで、 C_0 、 C_1 はそれぞれ、実験開始時、実験終了時のスクロース水溶液濃度を意味する。式(1)に濃度の時間変化を代入し、伝熱面温度の計測値との差から、 ΔT を算出する。以上の式より熱伝導率 λ_{ex} の時間変化の算出を行った。なお、氷層が形成されていなければ、 ΔT が小さく、熱伝導率を得ることができないため、十分に氷層が形成された、実験開始から 300 秒以降のデータを用いて比較した。

静止状態と、攪拌状態における熱伝導率の時間変化の対数近似曲線を図4に示す。すべての条件において、時間経過とともに熱伝導率が上昇する傾向が見られた。この原因として、伝熱面に対して針状に生成された氷が成長することにより、伝熱面近傍にて氷の存在割合が増し、より密な氷層が生成されたためであると考えられる。

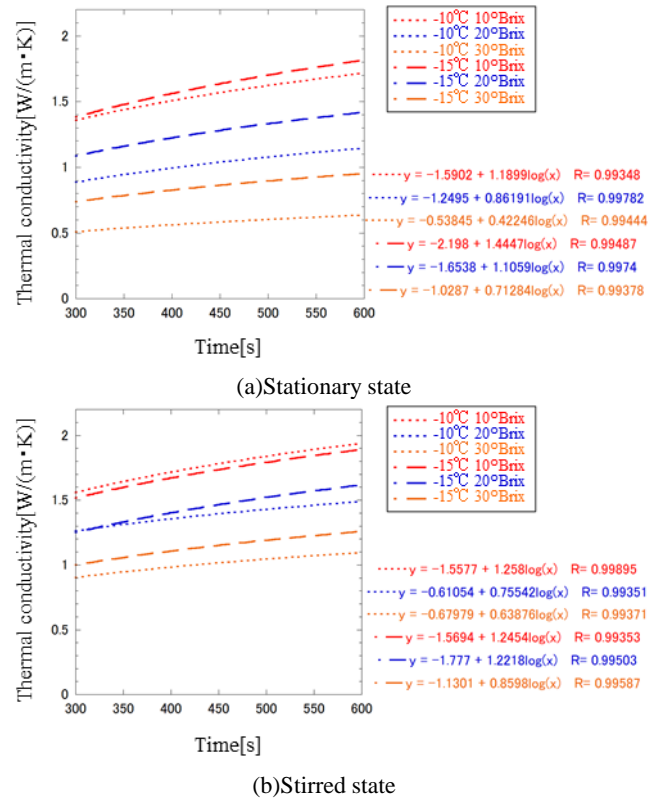


Fig. 4 Time variation of the thermal conductivity of the ice layer

得られた対数近似曲線より、熱伝導率が $2.2(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$ となり、氷層がすべて純粋な氷となるまでに必要な時間を表1に示す。全体で、静止状態と比較して、攪拌状態では短時間で純粋な氷となる傾向が見られた。攪拌状態において、不凍液温度 -10°C の条件では、 20°Brix 以上で1時間以上の製氷時間が必要であるが、不凍液温度 -15°C の条件では、 30°Brix 以上で2時間以上の製氷が必要であるとわかった。このことから、 20°Brix 以上においては、不凍液温度を -15°C 以下に設定することで、製氷効率の向上が推測される。

Table 1 Time required to become pure ice

| | Stationary state | | Stirred state | |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | -10°C | -15°C | -10°C | -15°C |
| 10°Brix | 0:25:32 | 0:18:27 | 0:16:11 | 0:17:43 |
| 20°Brix | 2:47:39 | 0:50:53 | 1:27:27 | 0:29:59 |
| 30°Brix | 842:44:42 | 9:23:54 | 8:51:44 | 2:02:58 |

5. 結言

本研究では、二重円筒型製氷器を用いて、スクロース水溶液における製氷実験を行い、伝熱面に形成される氷層の熱伝導率の算出を行った。氷層の熱伝導率は、静止状態と比較して攪拌状態で熱伝導率が上昇した。また本攪拌レイノルズ数範囲に対して熱伝導率との相関が得られず、水溶液濃度による影響が大きく見られた。また、氷層の熱伝導率の時間変化から、 20°Brix 以上の溶液においては、不凍液温度を -15°C 以下に設定することで、熱伝導率の低下を抑えることができ、製氷効率の向上が推測される。

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