

NaCl 水溶液における氷膜物性値の評価

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1200046 片岡 遥渚

1. 緒論

液状食材を加工する操作の一つとして濃縮法があり、その中でも凍結濃縮法は、低温下での操作により含有成分の劣化及び揮発を抑制し、高品質な濃縮液を得ることができる。しかし、複数の成分により構成されている液状食材を対象とする場合、製氷能力を試算することが難しく、氷膜の物性値の把握が必要とされている⁽¹⁾。本研究では、多成分水溶液の氷膜性状を定量的に得るために、その基礎データとしてNaClを含有させた単成分水溶液をサンプルとし、熱物性値の一つである熱伝導率について評価を行った。また、水溶液の濃度や攪拌状態を変化させ、先行研究⁽²⁾で既に評価を行っているスクロース水溶液との比較を行い、溶質の特性の違いによる熱伝導率への影響について調べた。

2. 実験装置の検討及び有効性の把握実験

氷の物性値が既知である純水を用いることで、実験装置の有効性を確認した。

2.1 薄膜生成による実験

2.1.1 熱収支モデル

フーリエの法則に基づき、熱収支モデルを図1に示す。

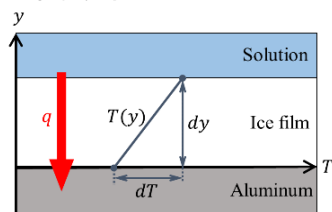


Fig. 1 Heat balance model

氷膜の熱伝導率 λ [W/(m·K)]は、

$$q = \lambda \frac{dT}{dy} \quad (2-1)$$

q : 熱流束[W/m²]

T : 温度[K]

$$\lambda = \frac{q}{dT/dy} \quad (2-2)$$

λ : 熱伝導率[W/(m·K)]

y : 伝熱面からの距離[m]

となる。これにより、氷膜間の熱流束及び温度勾配を計測することによって、氷膜の熱伝導率の算出が可能となる。

2.1.2 実験方法

(a) 実験装置

実験フローを図2に示す。製氷機はアクリル容器を厚さ10mm(材質A5052)のアルミ板で仕切り、-20°Cの冷媒(濃度60%, エチレングリコール)により水溶液を冷却する。冷却部の側面に ϕ 1.0mmのシース熱電対(CHINO製, 1HTF011)を高さ方向に3mm間隔で設置し、伝熱面に表面温度センサ(アズワン製, MF-SP-T)と熱流センサ(HIOKI製, Z2012-01)を接着させ、温度と熱流束の計測を行った。冷媒はサーモチラー(SMC製, HRSH090-AN-20, HRZ002 L1Y)で冷却した。氷膜厚さはカメラ(Canon製, EOS Kiss X4)とリモートコントローラ(ロジックジャパン製, Timing Remote Switch TC-2001)で撮影し、画像処理ソフトウェア Image J にて求めた。

(b) 実験手順

まず、伝熱面から最も近い位置に設置したシース熱電対まで純水を満たし、冷却した。薄膜生成後、純水300mLを冷却部に追加し、攪拌機(IKA製, EUROSTAR 20digital)と攪拌翼(翼スパン ϕ 60mm)を用いて $Re_r = 0$, 6000の攪拌状態下にて40分間の製氷を行った。温度と熱流束は1秒毎、氷膜厚さは1分毎に測定し、雰囲気温度は5°Cとした。また、先行研究⁽³⁾を参考にアルミ板上面にポリイミドテープを0, 3, 4層の3パター

ンで貼付した。各条件で3回ずつ実験を行い、平均値を求めた。

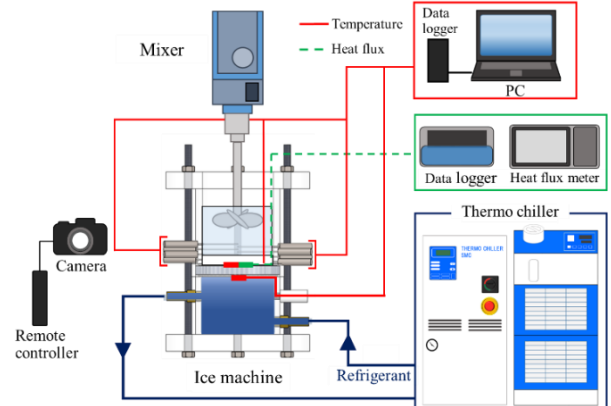


Fig. 2 Experimental flow

2.1.3 実験結果と考察

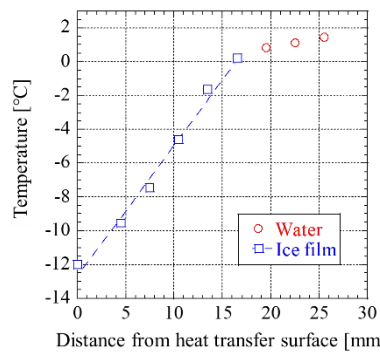


Fig. 3 Temperature gradient (Ice film thickness 16.5mm)

図3に示すように温度勾配は線形的となり、精度よく計測が行えた。また、ポリイミドテープを3層接着させた図4より、熱流束の計測値は算出値とほぼ一致した。しかし、NaCl水溶液を用いた場合、異なる2種類の氷膜が生成され、実験モデルが複雑化する。そこで、新たに種水を用いた実験方法の検討を行った。

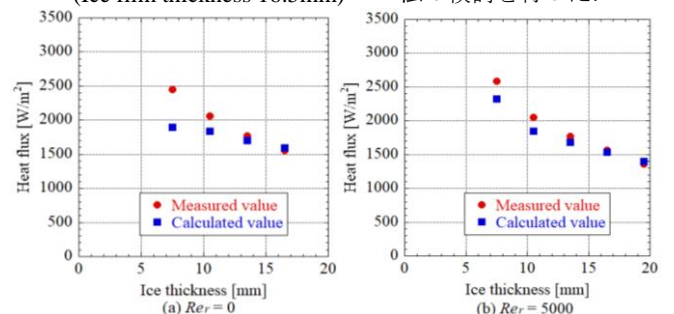


Fig. 4 Relationship between ice thickness and heat flux

2.2 種水を用いた実験

2.2.1 実験方法

熱収支モデル及び実験装置は前節と同様とする。また、前節の実験結果より、製氷機のアルミ板の上面にはポリイミドテープを3層接着したものを使用した。

実験手順は、まず冷却部で純水300mLを攪拌させながら冷却した。純水の温度が1°C付近で種水1mLを投入し、氷膜作成後、35分間の製氷を行った。サンプリング周期及び雰囲気温度は前節と同様の条件とし、各条件で3回ずつ実験を行い、平均値を求めた。

2.2.2 実験結果と考察

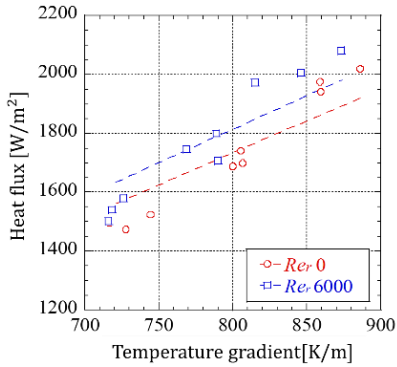


Fig. 5 Relationship between temperature gradient and heat flux

及び算出法の有効性を得た。

温度勾配と熱流束の計測値から、フーリエの法則に従い熱伝導率を線形近似式にて求めた結果を図5に示す。 $Re_r=0, 6000$ において、それぞれ $\lambda = 2.1625, 2.268 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ となり、純水の氷の熱伝導率 $2.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ に対して1.6%, 3.1%の誤差であり、ほぼ同様の値が算出された。このことから、実験装置

3. NaCl 水溶液における氷膜熱伝導率算出実験

3.1 実験目的

NaCl水溶液における氷膜の熱伝導率を実験的に求め、濃度や攪拌状態に対する変化を調べる。また、電離が熱伝導率に及ぼす影響について考察する。

3.2 実験方法

実験装置及び熱収支モデルは前章と同様とする。

3.2.1 濃度の決定

先行研究で使用されたスクロース水溶液の質量モル濃度と一致するよう、NaCl水溶液の濃度を決定した。また、電離を考慮し、濃度は0.94, 2.09, 3.53wt%の水溶液を使用した。さらに、マルチ水質計(東亜ディーケーケー製, MM-60R)により、検量線を作成し、導電率の測定値より濃度の算出を行った。

3.2.2 実験手順

冷却部でNaCl水溶液300mLを攪拌させながら冷却した。凝固点に対して1°C高い温度のときに種氷1mLを投入し、氷膜作成後40分間の製氷を行った。攪拌レイノルズ数は、 $Re_r = 0 \sim 5000$ (1000間隔)の6パターンとした。温度と熱流束は1秒毎、氷膜厚さは1分毎に測定し、雰囲気温度は5°Cとした。各条件で3回ずつ実験を行い、平均値を求めた。

3.2.3 実験結果と考察

攪拌レイノルズ数に対する熱伝導率、及び氷膜内濃度の変化を先行研究の結果も併せてそれぞれ図6、図7に示す。実験結果より、攪拌レイノルズ数の増加に伴い熱伝導率は増加し、氷膜内濃度は低下した。これは、攪拌状態が氷膜の形状に影響したと考えられる。撮影した氷膜を図8に示す。 $Re_r = 0$ のように針状の氷が形成されると、水溶液は濃縮され氷間に存在すると考えられる。また、氷膜内では高さ方向に温度分布が生じているため、氷間の水溶液は、温度と凝固点とが平衡状態となる濃度で高さ方向に分布すると考えられる。20°CでのNaCl水溶液の濃度と熱伝導率の関係は⁽⁴⁾,

$$\lambda_w = 0.60322 - 0.0014126w \quad (3-1)$$

λ_w : 熱伝導率[W/(m·K)], w : 濃度[wt%]

で表され、熱伝導率は氷膜内に存在する水溶液の容積と濃度が影響したと推測できる。また、氷膜内の温度分布と氷膜厚さにより熱伝導率が変化することも示唆される。このことから、今後は熱伝導率の算出法について、さらに詳細に氷膜内の状態を考慮した検討が必要であると考える。一方、スクロース水溶液とNaCl水溶液の質量モル濃度を純粋に溶質の物質質量と溶媒の質量から求め、スクロース水溶液を用いた実験結果と比較すると、攪拌レイノルズ数における氷膜内濃度の値がほぼ一致した。氷膜の熱伝導率は氷膜内濃度ほど一致しなかったものの、質量モル濃度が熱伝導率の値に影響していると考えられ、今後は質量モル濃度を基準に、熱伝導率の試算

を行う検討が有効である。

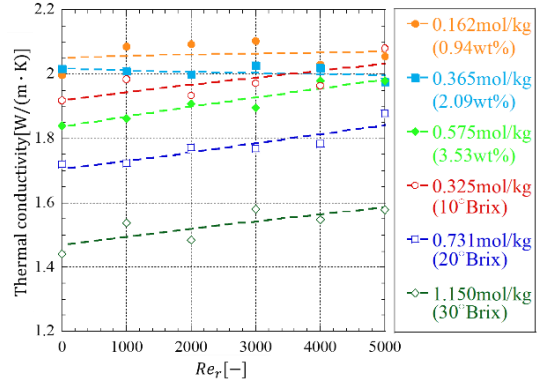


Fig. 6 Variation of thermal conductivity with stirring Reynolds number

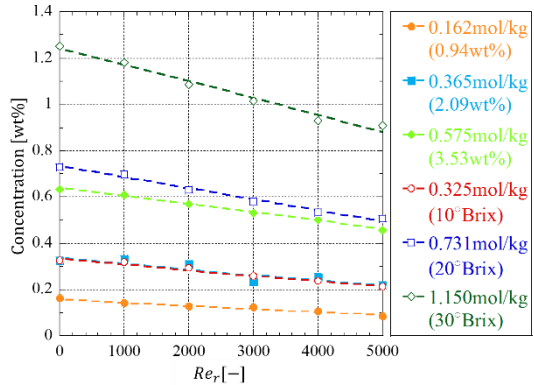


Fig. 7 Change of concentration in ice film with stirring Reynolds number

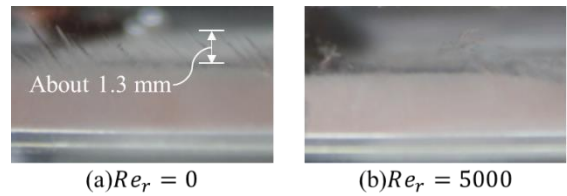


Fig. 8 Ice shape at a concentration of 0.94wt%

4. 結言

本研究では、多成分水溶液の氷膜性状を定量的に得るための基礎データとして、NaCl水溶液による熱伝導率の評価を行った。実験結果より、攪拌レイノルズ数の増加に伴い氷膜内濃度は低下し、熱伝導率は増加した。これは攪拌状態により異なる形状の氷膜が生成されたことで、氷膜内の溶質濃度が変化し、熱伝導率に影響したと考えられる。また、熱伝導率の値は質量モル濃度と関係していると考えられ、今後は氷膜内の溶質濃度分布を考慮し、氷膜厚さにおける熱伝導率の算出を行い、他成分水溶液のデータ蓄積と検証が必要である。

参考文献

- (1) 松本泰典, スラリー生成技術を用いた凍結濃縮システムの開発, Fooma 技術ジャーナル(2016), 11(1), pp35-44
- (2) 田村健太, 水溶液を用いた氷膜の熱伝導現象に関する研究, 高知工科大学知能機械システム工学コース修士論文(2020)
- (3) 中田功一郎, 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, 高知工科大学工学研究科基盤工学専攻修士論文(2019), pp.6-11
- (4) 日本熱物性学会, 新編 熱物性ハンドブック, 養賢堂(2018), pp164