

卒業論文要旨

円筒座標系伝熱における氷膜物性値の実験的検証

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1210005 東 真弘

1. 結論

液状食品の加工法の1つに濃縮法がある。濃縮法は大別して3つに分類され、中でも凍結濃縮法は、低温下で濃縮するため、水溶液中に存在する成分の変質や揮発を抑えることができ、高品質な濃縮液を生成することが可能となる。しかし、技術的な問題として多成分で構成される液状食品を用いた場合には、製氷中に溶質が氷膜内に混在してしまうため、設計段階で製氷能力を試算することが難しく、氷膜の物性値を把握すること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解明する前段階として、単成分水溶液であるNaCl水溶液をサンプルとし、氷膜物性値の1つである熱伝導率の算出を行う。また、片岡の研究報告⁽²⁾では、直交座標系の製氷装置を用いている。このことから本研究では円筒座標系の製氷装置に着目し、伝熱面の形状による影響を調べることで、水溶液から形成される氷膜成長のメカニズムを解明する。

2. 純水における製氷実験

固相の物性値が既知である純水を用いて、製作した実験装置、物性値算出法の有効性を確認した。

2.1 実験方法

実験装置の全体フローを図1に示す。外径より中心に向かって、冷媒部、伝熱部、水溶液の冷却部の3つで構成されている。上下面2つのアクリル製フランジの間に外径190mm、厚さ10mmのアクリルパイプと外径137mm、厚さ3mmのステンレスパイプ(材質 SUS304)を配置させている。

冷却部は上部開放型であり、上部よりφ1.0mmのシースT型熱電対(CHINO製, 1HTF011)を内側伝熱面から4mmの位置、以後3mm間隔で合計8本挿入し、装置上部より70mmにおける温度を計測できるように設置した。また、ステンレスパイプの高さ方向の中央に表面温度センサ(アズワン製, MF-SP-T)をパイプの内側と外側に2カ所、熱流センサ(HIOKI製, Z2012)をステンレスパイプ内側の2カ所にそれぞれ設置し、伝熱面の温度と熱流束を計測した。

冷媒を冷却するためのサーモチャラーは、空冷式サーモチャラー(SMC製, HRS090-AN-20)と水冷式サーモチャラー(SMC製, HRZ002 L1Y)によって構成されている。

また、中田らの研究報告^(2,3)を参考に、伝熱面での熱移動の均一化を図るため、伝熱面内側にポリイミドテープを3層貼り付けた。

まず、装置の伝熱面の全てに接するように純水1550gで満たし、攪拌機(IKA製, EUROSTAR 20 digital)にて攪拌翼(翼スパンφ60mm)を回転させることで水溶液の温度を一様にした。

次に、温度と熱流束の計測を開始し、-20℃の冷媒(濃度60%エチレングリコール)を循環させ、冷却を行った。氷膜生成開始後、カメラ(Canon製, EOS Kiss X9i)とリモートコントローラー(ロワジャパン製, Timing Remote Switch TC-2001)

によって氷膜を撮影し、40分間製氷を行った。氷膜厚さは、画像処理ソフトImage Jを用いて求めた。攪拌レイノルズ数は $Re_r = 0, 6600$ の2パターン、サンプリング周期は温度と熱流束は1秒ごと、氷膜厚さは1分ごととした。実験は雰囲気温度5℃の恒温室内にて、各条件で3回ずつ行った。

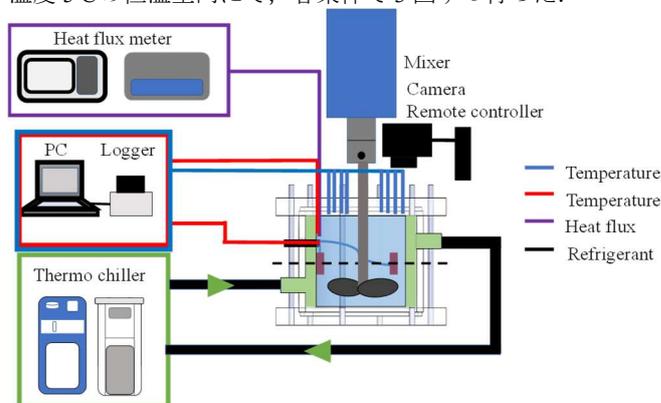


Fig.1 Experimental flow

2.2 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2に示す。

氷膜の熱伝導率 λ は、

$$q_r = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

$$\lambda = -\frac{q_r}{\frac{dT}{dr}} \quad (2)$$

q_r :熱流束[W/m²]

λ :熱伝導率[W/(m·K)]

T :温度[K]

r :伝熱面から中心方向の距離[m]

と表せ、本式より氷膜間の熱流束及び温度勾配を計測することで氷膜の熱伝導率が算出可能である。

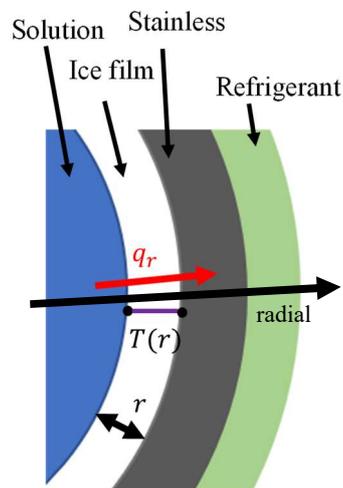


Fig.2 Heat balance model

2.3 実験結果と考察

温度勾配と熱流束の測定値より、熱伝導率を線形近似式にて求めた結果を図3に示す。 $Re_r = 0$ のとき2.3828W/(m·K)、 $Re_r = 6600$ のとき2.3303W/(m·K)となり、その平均は2.357W/(m·K)となった。また、純水から生成した氷である場合、温度と熱伝導率の関係式は、

$$\lambda_i = 2.22 - 1.01 \times 10^{-2}T + 3.45 \times 10^{-5}T^2 \quad (3)$$

T :温度[K] λ_i :熱伝導率[W/(m·K)]

となる。 $Re_r = 0$ のとき2.30W/(m·K)、 $Re_r = 6600$ のとき2.31W/(m·K)となった。実験値と算出した値との誤差は、 $Re_r = 0$ のとき約3.6%、 $Re_r = 6600$ のとき約0.9%となった。

したがって、誤差が5%以内であったため、実験装置及び熱伝導率の算出法が有効であると判断した。

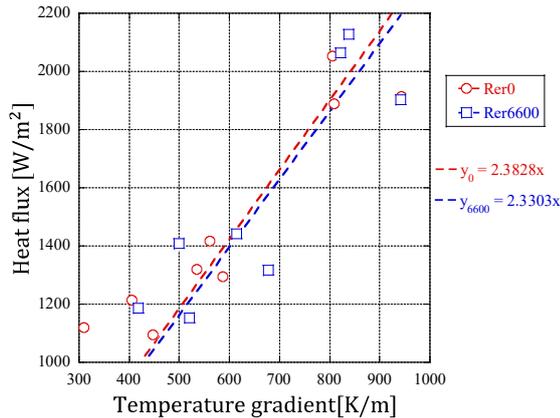


Fig.3 Relationship between temperature gradient and heat flux

3. NaCl 水溶液における製氷実験

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る。同時に初期濃度や攪拌レイノルズ数をパラメータに、熱伝導率への影響についても検証する。また、直交座標系での実験結果と比較することにより、氷膜内に取り込まれる溶質量の違いについて述べる。

3.2 実験方法

実験装置及び熱収支モデルは前章と同じものを使用する。片岡の研究報告⁽²⁾において使用された水溶液と同じ質量パーセント濃度である、0.94、2.09、3.53wt%の NaCl 水溶液を使用した。濃度の測定には、塩分濃度計 (ATAGO 製、ポケット塩分濃度計、PAL-SALT) とマルチ水質計 (東亜ディーケーケー製、MM-60R) を使用した。片岡が報告⁽²⁾した検量線より、質量パーセント濃度を求めた。

まず、装置の伝熱面の全てに接するように NaCl 水溶液で満たした。攪拌機 (IKA 製、EUROSTAR 20 digital) によって攪拌翼 (翼スパンφ60mm) を回転させることで水溶液の温度を一樣にした。

次に、温度と熱流束の計測を開始し、サーモチラーにより冷媒を循環させ、水溶液の冷却を行った。水溶液の温度が凝固点より 1.5℃高いときに種氷 4ml を冷却部に投入し、40 分間の製氷を各条件で 3 回ずつ行い、各平均値を求めた。

3.3 実験結果と考察

各濃度における、攪拌レイノルズ数と熱伝導率の関係を片岡の研究報告⁽²⁾の結果も併せて図 4 に示す。

0.94wt%、2.09wt%では、攪拌レイノルズ数が増加するにつれ、熱伝導率の上昇が見られた。しかし、3.53wt%では、攪拌レイノルズ数が増加するにつれ、熱伝導率の下降傾向が見られた。

直交座標系では、氷膜が一定の面積を保ちながら成長するが、円筒座標系では氷膜が成長するに従い固液界面の面積が減少する。また、氷膜は針状に成長することが明らかになっている。したがって、攪拌が十分でないとき、氷針間に残存する水溶液量が多くなる。また、直交座標系では伝熱面に近づくほど濃度が高くなり、水平方向に対して一樣な濃度となる。一方、円筒座標系では垂直面である伝熱面から中心方向に氷膜が成長するため攪拌が十分にされていないときは密度差の影響で自然対流が起り、氷と水溶液の界面で濃度分布が発生してしまう。これにより、熱伝導率が伝熱面の位置で異なることが考えられる。

次に各濃度における、攪拌レイノルズ数に対する氷膜内濃度の変化を片岡の研究報告⁽²⁾の結果も併せて図 5 に示す。

氷膜内濃度の実験結果と片岡の研究報告⁽²⁾結果の比較をすると、直交座標系より円筒座標系の方が濃度勾配は緩やかである。攪拌が十分でないとき、装置の上部と下部で濃度分布が発生し、下部は高濃度になる。各座標系における氷膜内に取り込まれる水溶液は、直交座標系するとき、下部にある伝熱面から高さ方向の成長であるため、高濃度の水溶液から氷膜が生成される。円筒座標系の場合、側面にある伝熱面から中心方向の成長であるため自然対流が発生し、直交座標系よりも低濃度で氷膜が成長する。したがって、攪拌が十分でないとき、氷膜生成時の水溶液の濃度の違いにより円筒座標系の方は濃度勾配が緩やかになったと考えられる。

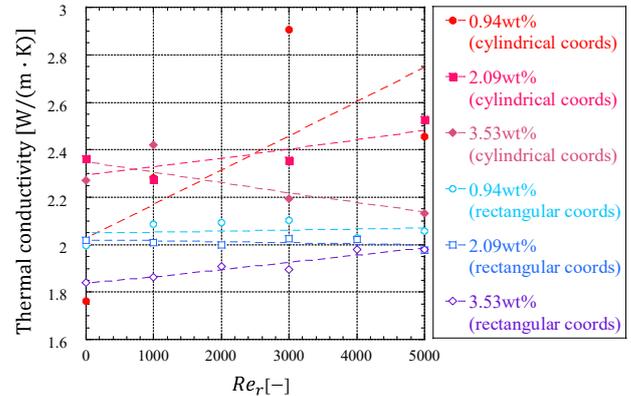


Fig.4 Variation of thermal conductivity with stirring Reynolds number

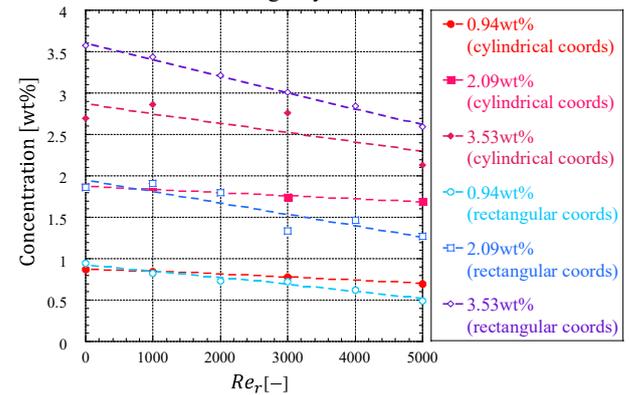


Fig.5 Change of concentration in ice film with stirring Reynolds number

4. 結論

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。攪拌レイノルズ数の変化に伴う氷膜の熱伝導率変化は各濃度条件によって異なった。しかし、氷膜内濃度は攪拌レイノルズ数が増加するにつれ低下した。十分に攪拌されていないとき、円筒座標系では装置内で濃度分布が発生し、熱伝導率が伝熱面の位置で異なることが考えられる。また、座標系による熱伝導率への影響は未だ明確でないため、更なるデータの蓄積と検証が必要である。

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), pp.35-44
- (2) 片岡遥渚: NaCl 水溶液における氷膜物性値の評価, 高知工科大学システム工学群航空宇宙工学専攻卒業論文 (2020)
- (3) 中田功一郎:伝熱面に形成されるスクロ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