

# 円筒伝熱面における氷膜物性値の実験的検証

## Experimental Verification of Ice Film Properties on Cylindrical Heat Transfer Surfaces

知能機械工学コース

ものづくり先端技術研究室 1255001 東 真弘

### 1. 緒論

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、その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<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)</sup>では、氷膜の面積が変化することなく成長する製氷装置を用いている。本研究ではスラリーアイス生成に用いられている円筒氷膜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、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、製作した実験装置および物性値算出法の有効性を確認する。また、純水の攪拌有無により熱伝導率に及ぼす影響を調べる。

#### 2.1 実験装置について

実験装置は、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。塩ビ製の容器と上面に塩ビ製フランジがあり、その間に外径120mm、厚さ10mmのステンレスパイプ(材質 SUS304, 熱伝導率 16.7W/(m・K))を配置させている。上面のフランジとパイプ及び容器は、Oリングを介すことで冷媒や水溶液の漏れを防いでいる。また水溶液の排出口を作り、バルブを取りつけた。

ステンレスパイプと塩ビ容器の間には、-20℃に冷却した濃度60%のエチレングリコールを循環させる。これにより、冷却されたステンレスパイプの内面を伝熱面として中心方向に氷膜を成長させる。

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6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, Z2013)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。装置の周囲は侵入熱の影響を受けないように断熱材で被覆した。

次に、全体フローをFig.1に示す。冷媒として使用しているエチレングリコールを冷却するために、サーモチャラー(EYELA製, CAE-1020A)を使用した。

温度センサはシースT型熱電対および表面温度センサをデータロガー(キーセンス製, NR-TH08, NR-500)に接続し、熱流センサはワイヤレス熱流ロガー(HIOKI製, LR8510, LR8416)に接続することで測定を行った。

氷膜厚さは上部フランジに50mmのスケールを設置し、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)によって装置の上面から氷膜を撮影した後、スケールを基準にして画像処理ソフトImage Jを用いて氷膜厚さを求めた。

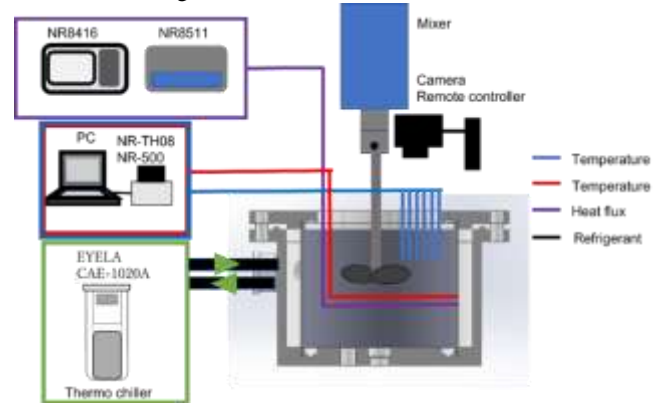


Fig.1 Overall Flow

また、中田らの研究報告<sup>(2)(3)</sup>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、熱流束センサと同じ厚みになるようにポリイミドテープを4層貼り付けた。

#### 2.2 熱収支モデル

定常熱伝導方程式とフーリエの式から熱伝導率を算出した。

$$q_r = \lambda \left\{ \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right\} \cdot \frac{1}{r} \quad (1) \quad \begin{array}{l} q_r : \text{熱流束}[\text{W}/\text{m}^2] \\ \lambda : \text{熱伝導率}[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \\ r : \text{中心からの距離}[\text{m}] \end{array}$$

$T_1$  : 固液界面の温度[K]

$T_2$  : 伝熱面の温度[K]

$r_1$  : 中心からの距離[m]

$r_2$  : 中心からの距離[m]

これにより、氷膜間の熱流束およ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。

実験手順として、まず冷却部で純水830mLを攪拌させながら冷却した。氷膜作成後、50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25℃とした。実験は雰囲気温度25℃の部屋にて各条件で3回行い、平均値を求めた。また $Re_r = 1000 \sim 5000$ の1000間隔に1回行った。

#### 2.3 実験結果と考察

実験結果をFig.2に示す。 $Re_r = 0$ のとき2.190 W/(m・K)、 $Re_r = 6000$ のとき2.206 W/(m・K)となり、その平均は2.20 W/(m・K)である。それぞれ2.20 W/(m・K)からの誤差は0.2%、0.4%となり誤差範囲±5%以内となった。

純水の熱伝導率が2.2 W/(m・K)であるため、この実験装置は有効であることが示された。

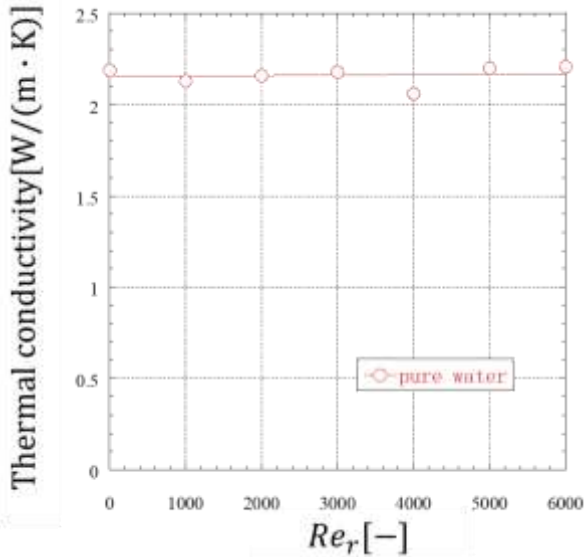


Fig. 2 Relationship between thermal conductivity and agitated Reynolds number

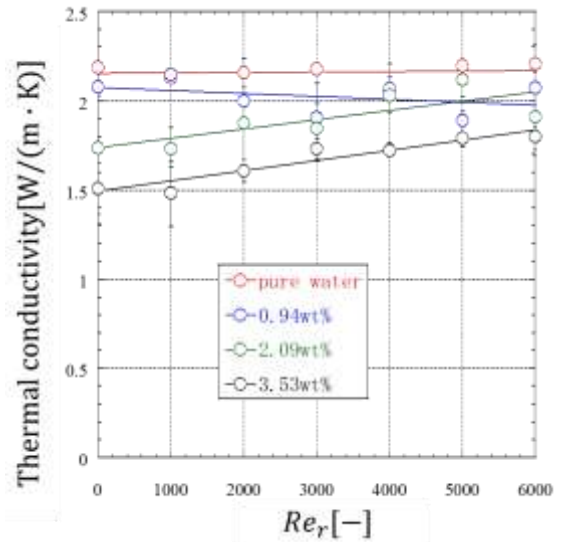


Fig. 3 Relationship between thermal conductivity and agitated Reynolds number

### 3. NaCl 水溶液における製氷実験

#### 3.1 実験目的

実験装置の有効性が得られ、氷膜の熱伝導率が得られることを確認した。そこで、NaCl 水溶液における氷膜の熱伝導率を実験的に求める。加えて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、考察では、片岡の研究報告<sup>2)</sup>で得られている固液界面の面積が経時変化で一定の装置との実験結果を比較することにより、氷膜内に含有す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<sup>2)</sup>において使用された水溶液と同じ重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。濃度の測定には濃度の測定には、屈折計 (ATAGO 製, RX-5000 plus) を使用した。生成した水溶液を屈折計に入れ、屈折率を計測した。全ての濃度で 3 回計測し平均値を求めた。

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様にした。

次に、温度と熱流束の計測を開始し、サーモチャ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 Fig. 3 に示す。

0.94wt%では、攪拌レイノルズ数の増加に伴い熱伝導率の値は変化が見られなかった。

2.09wt%, 3.53wt%では、攪拌レイノルズ数が上昇するにつれ、緩やかな熱伝導率の上昇が見られた。

次に、攪拌レイノルズ数に対する氷膜内濃度の変化を Fig. 4 に示す。攪拌レイノルズ数が増加するにつれ、氷膜内濃度が低下していた。水溶液の初期濃度が上昇するに従い、氷膜内濃度も上昇していた。

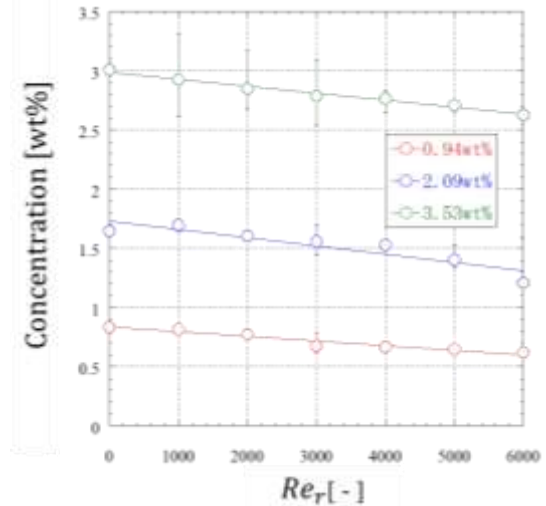


Fig. 4 Relationship between concentration in ice film and stirring Reynolds number

固液界面に存在する層流域を境膜とし、境膜内の物質移動を考える。フィックの法則と境膜内の拡散式より、シャーウッド数で評価することにした。攪拌レイノルズ数とシャーウッド数

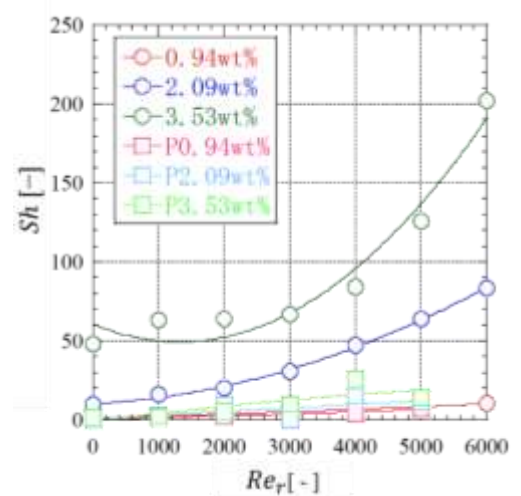


Fig. 5 Relationship between Sherwood number and agitated Reynolds number

の関係性を片岡の研究報告で算出したものと合わせて Fig.5 に示す。

片岡の研究報告<sup>9)</sup>も同様に水溶液の濃度が高くなるにつれ、シャーウッド数が高くなることがわかった。しかし、攪拌レイノルズ数に対するシャーウッド数の増加率が本研究装置のほうが高かったことから、物質の移動は固液界面の面積が経時変化で減少するほうが効率よく濃縮できると考えられる。また、伝熱面から鉛直方向上向きに固液界面の面積が一定で、氷膜が成長する装置と比較すると、層流域で密度差による重力拡散が起こっていると考えられる。

#### 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。実験結果より、攪拌レイノルズ数が増加するにつれ、氷膜内濃度が減少し、熱伝導率が増加することがわかった。また片岡の研究報告<sup>10)</sup>と比較するこ

とで、固液界面付近の濃度勾配をシャーウッド数で評価した。濃度分配係数を用いた比較においても同様に線形的な相関が得られた。今後は氷膜の形状や成長過程を観察することで、層流域の存在場所を明らかにし、攪拌することで起こる層流域の厚みの変化を見る必要がある。

また、熱伝導率においても氷膜が成長するにつれ、熱伝導率の減少傾向が得られたため、より詳細な熱伝導率を算出するために、更なる検証や装置に応じた測定方法で検証する必要がある。

#### 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, *Foama 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, 高知工科大学知能機械システム工学コース修士論文(2022)
- (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