

卒業論文要旨

エタノールと NaCl の 2 成分水溶液における氷膜熱伝導率の評価

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1240161 森 亮介

1. 緒言

凍結濃縮法は加熱蒸発法や膜濃縮に比べ、低温下での操作であるため、成分の変質や香り成分の損失を抑え、高品質な濃縮液を得ることができる。しかし、製氷過程において伝熱面に形成された氷膜に溶質が取り込まれることで氷膜の熱物性値が変化してしまい、製氷能力、製氷時間の試算が困難となる。本研究は、エタノールと NaCl を混合させた 2 成分水溶液における熱伝導率の傾向を調べる。これにより、先行研究^{1,2)}より報告された単成分水溶液によるデータと比較することで、成分の相互作用について明らかにする。

2. 2 成分水溶液の各成分濃度測定方法確立

2.1 実験目的

エタノールと NaCl が混合した水溶液にて各々の濃度を精度良く計測することが難しい。そこで今得られたデータから濃度を算出する方法を検討した。

2.2 実験方法

(a) 屈折率

屈折率計 (ATAGO 製, RX-5000i-Plus) を用いて、エタノール濃度 0vol%, 1.86vol%, 4.09vol%, 6.81vol% に、NaCl 濃度 0wt%, 0.94wt%, 2.09wt%, 3.53wt% を混在させて屈折率を測定した。

(b) 電気伝導率

マルチ水質計 (東亜 DKK 製, MM-60R) を用いて、電気伝導率を測定した。図 1 に電気伝導率測定の概要を示す。NaCl 水溶液約 200ml をビーカーに入れ、30mm の攪拌棒を用いて 200rpm で攪拌させる。ホットプレートスターラーを 20℃ にセットし水溶液温度が安定した後、電気伝導率を測定した。サンプル濃度範囲はエタノール濃度 0vol%, 1.86vol%, 4.09vol%, 6.81vol% に NaCl 濃度 0.94wt%, 2.09wt%, 3.53wt% とした。

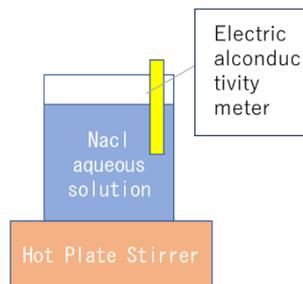


Fig.1 Measurement of electrical conductivity

2.3 実験結果

屈折率測定結果を図 2 に示す。エタノール濃度が上昇するに従い、屈折率が線形的に上昇した。また NaCl 濃度が増加すると屈折率も上昇する傾向になった。

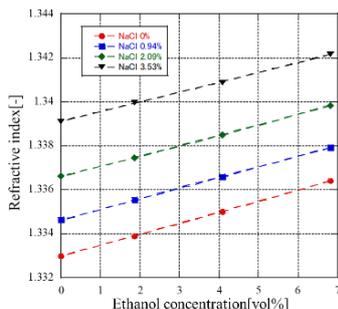


Fig.2 Relationship of ethanol concentration and refractive

電気伝導率の測定結果を図 3 に示す。エタノール濃度が高くなるにしたがって、電気伝導率は線形的に低下した。また NaCl 濃度が高いほど、電気伝導率は高い。

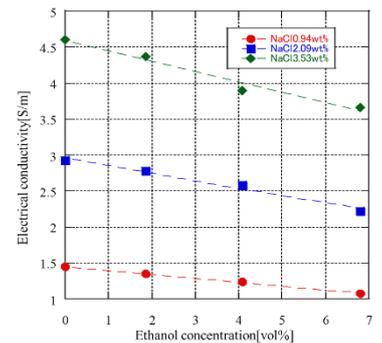


Fig.3 Relationship of ethanol concentration and electrical conductivity

2.4 考察

2.4.1 算出方法

図 2 より、エタノールと NaCl の濃度と屈折率の実験より式 (2-1) を得た。

$$x = (-6.1659 \times 10^{-7} C_N^2 - 1.2969 \times 10^{-5} C_N + 5.0068 \times 10^{-4}) C_E + 0.0017298 C_N + 1.3330 \quad (2-1)$$

C_E : エタノール濃度 [vol%]
 C_N : NaCl 濃度 [wt%]
 x : 屈折率 [-]

また、図 3 より、エタノールと NaCl の濃度と電気伝導率の関係となる

$$y = (0.005908 C_N^2 - 0.062088 C_N - 9.705 \times 10^{-5}) C_E - 0.083527 C_N^2 + 1.5939 C_N + 0.0075997 \quad (2-2)$$

y : 電気伝導率 [S/m]

を得た。この 2 式に屈折率と電気伝導率の測定値を代入し、連立することで各濃度を求める。

2.4.2 計測法の有効性確認

エタノール濃度 1.86vol%, 4.09vol%, 6.81vol%, NaCl 濃度 0.94wt%, 2.09wt%, 3.53wt% を組み合わせた 9 種類の混合水溶液をサンプルとして検証を行った。サンプル濃度における屈折率と導電率の測定値を式 (2-1), (2-2) に代入し、各成分濃度を求めた。誤差割合の最大値は、エタノール濃度で 6.26%、NaCl 濃度で 2.45% となり、本方式の濃度算出の有効性を得た。

3. 2 成分水溶液における氷膜熱伝導率算出実験

3.1 目的

エタノールと NaCl の 2 成分水溶液における氷膜の熱伝導率を実験的に求める。実験に用いたサンプルの濃度と攪拌状態をパラメータに氷膜の評価を行う。得られたデータについては先行研究の単成分水溶液を用いた研究データと比較を行い、他溶質が混合したことによる影響を検証する。

3.2 実験方法

3.2.1 熱収支モデル

本実験による熱収支モデルを図 4 に示す。フーリエの法則より、熱伝導率は次式で求められる。実験では、氷膜間の熱流束、水-氷界面温度、伝熱面温度を測定した。

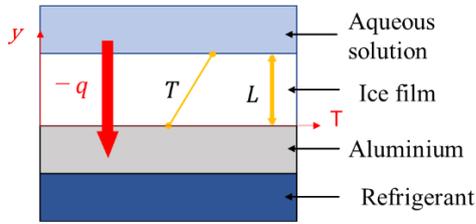


Fig.4 Heat balance model

$$q = -\lambda \frac{dT}{dy} \quad (3-1)$$

$$\lambda = q \frac{L}{T_{high} - T_{low}} \quad (3-2)$$

q : 熱流束[W/m²] λ : 熱伝導率[W/(m·K)]
 T : 温度[K] y : 伝熱面からの距離[m]
 L : 氷膜厚さ[m]

3.2.2 実験装置

本実験では、先行研究により有効性が確認された装置を使用する。実験装置フローを図5に示す。2つのアクリル円筒容器の間に厚さ10mmのアルミ板(材質A5052, 熱伝導率137W/(m·K))で仕切り、上部は冷却部となっており、アルミ板上面を伝熱面とする。下部に冷媒(エチレングリコール60%)を-20°Cで循環させ冷却する。冷却部側面に固液界面温度測定のため、 ϕ 1.0mmのシース熱電対(CHINO製, 1HTF011)をアルミ板の上面から4mmの位置、それ以上の高さについては3mm間隔で合計8本挿入した。さらに、表面温度センサ(アズワン製, MF-SP-T)をアルミ板の両面に接着し、熱流センサ(HIOKI製, Z2012-01)をアルミ板上面の3箇所に接着することで伝熱面の両面温度と熱流束を計測した。冷媒の冷却にはサーモチャラー(EYELA製, CAE-1020A)を使用した。温度はシース熱電対および表面温度センサをデータロガー(キーエンス製, NR-TH08, NR-500)に接続し、熱流束は熱流センサを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、カメラ(Canon製, EOS Kiss X4)とリモートコントローラ(ロワジャパン製, Timing Remote Switch TC2001)によって冷却装置側面の窓から氷膜を撮影し、画像処理ソフトウェアImageJを用いて内円筒側面に貼付した幅10mmのテープを基準にして求めた。

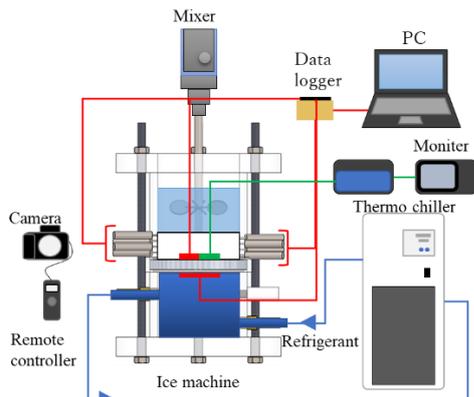


Fig.5 Experimental Equipment Flow

3.2.3 実験に用いる水溶液濃度の決定

先行研究では、スクロース水溶液の濃度10,20,30wt%のサンプルで実験が行われている。また、NaCl, エタノール水溶液では、それぞれスクロース水溶液の質量モル濃度と同等の0.94wt%, 2.09wt%, 3.53wt%, 1.86vol%, 4.09vol%, 6.81vol%で実験が行われている。そこで本実験では、これらを組み合わせた、9種類のサンプルで実験を行った。

3.2.4 実験時の攪拌回転数の決定

攪拌レイノルズ数が,0,1000,3000,5000で実験を行った。攪拌レイノルズ数と攪拌翼の回転数の関係は、

$$N_r = \frac{60Re_r\mu}{\rho d^2} \quad (3-20)$$

Re_r : 攪拌レイノルズ数[-] ρ : 密度[kg/m³]
 N_r : 回転数[rpm] μ : 粘度[Pa·s]
 d : 攪拌翼径[m]

であるため、各水溶液において密度、凝固点の粘度を求め、攪拌回転数を算出した。

3.2.5 実験手順

冷却部を2成分水溶液300mLで満たし、攪拌しながら冷却した。温度、熱流束の測定は、サンプリング周期1sとした。また、過冷却の影響を無くすため、凝固点より1°C高いとき1mlの種氷を投入した。伝熱面に氷が生成されると取り出し、サンプリング周期1minで氷膜厚さをカメラで撮影した。

3.3 実験結果と考察

エタノール濃度1.86vol%, 4.09vol%, 6.81vol%, NaCl濃度0.94wt%, 2.09wt%, 3.53wt%を組み合わせた9種類の混合水溶液をサンプルとして製氷実験を行った。得られた氷膜の熱伝導率とNaCl濃度の関係を図6に示す。なお、図中の(a)~(d)については、攪拌レイノルズ数 $Re_r = 0, 1000, 3000, 5000$ で水溶液を流動化させた実験条件で分けている。

エタノール濃度が高くなるに従い氷膜熱伝導率が小さくなる傾向となった。攪拌レイノルズ数5000のとき、他と比べても熱伝導率が線形的に減少せず不規則な傾向がみられる結果となった。これは攪拌する回転数が速いことで水溶液に気泡が発生したことが原因として考えられる。また、図6(b),(d)の攪拌レイノルズ数1000,3000のときに、エタノール濃度によらずNaCl濃度が上昇すると、氷膜の熱伝導率は線形的に減少する結果となった。また、NaCl濃度と熱伝導率の関係よりNaCl水溶液の熱伝導率に比べ、エタノールを混合させた時の熱伝導率は低下した。

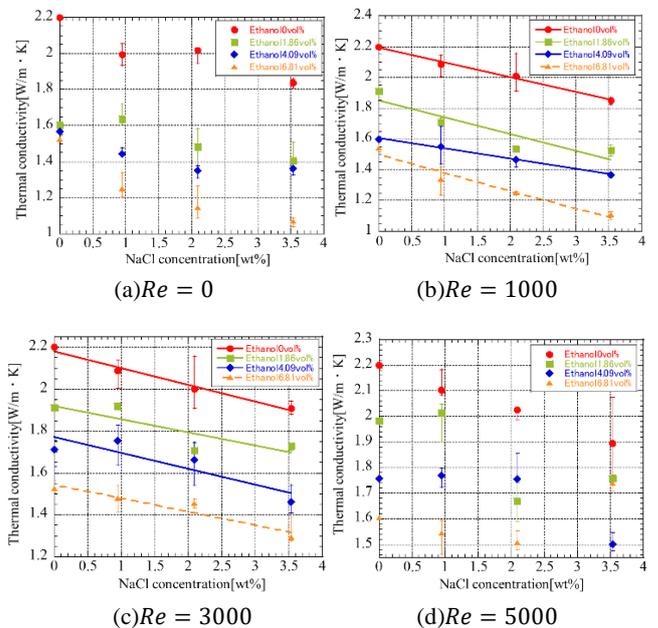


Fig.6 Relationship of NaCl concentration and Thermal conductivity in each stirring Reynolds number

NaCl 初期濃度と熱伝導率の関係を単成分水溶液も交え、攪拌レイノルズ数ごとにまとめ、図7に示した。

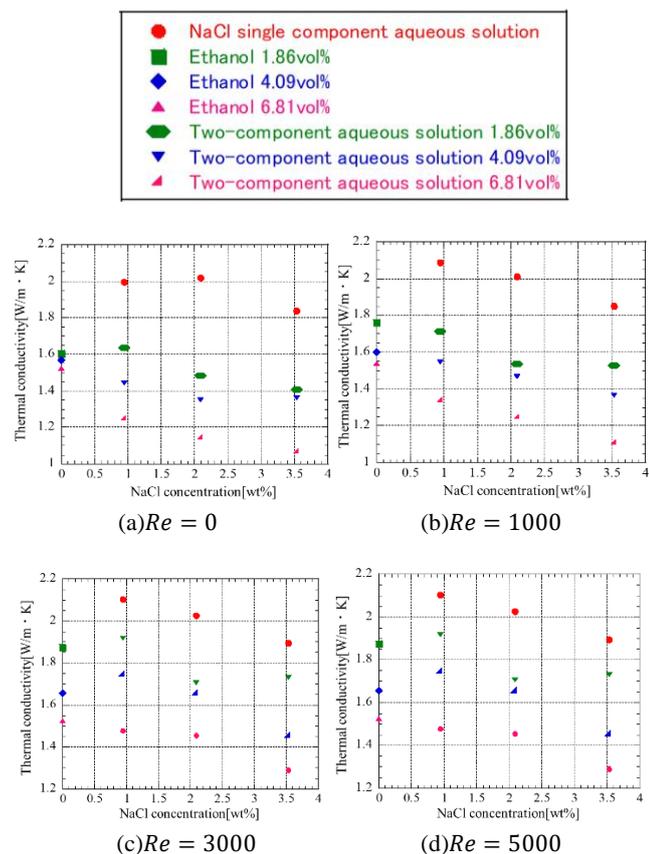


Fig.7 The relationship between thermal conductivity and NaCl concentration in single-component and two-component aqueous solutions

図7を見ると、2成分水溶液でエタノール濃度1.86vol% NaCl濃度0.94wt%においては各攪拌レイノルズ数でエタノール単成分水溶液(図7の一番左)の熱伝導率の値とほぼ同値となった。つまり、氷膜内においてエタノール、NaClの濃度が低いときNaClの影響は小さいことが考えられた。これはエタノールとNaClの水への溶けやすさが関係しているのではないかと考えた。今回の2成分の場合NaClの方が水に溶けやすく、溶け残ったエタノールの溶質が多く氷膜に含まれたのではないかと考えた。

4. 結論

凍結濃縮機において、製氷機の伝熱面に生成された氷膜の熱伝導率が溶質の種類や濃度で変化し、製氷時間や製氷能力の試算が困難であるという課題がある。そこで本研究室では、液状食品から生成された氷膜の熱伝導率を予測することを目標に実験を行った。サンプルにはエタノールとNaClの2成分水溶液を用いた。

しかし、混合水溶液を用いた実験を行う際に、各成分濃度を同時に測定することは困難である。そこで熱伝導率を計測するエタノールとNaClの混合水溶液において、屈折率と電気伝導率の計測値から各成分濃度を精度良く求める方法を確立した。

また、NaClとエタノールの混合溶液をサンプルに、伝熱面に形成した氷膜の熱伝導率と、水溶液の流動状態を表す攪拌レイノルズ数の関係を調べた。また、NaCl水溶液およびエタノール水溶液での単成分水溶液をサンプルに氷膜の熱伝導率を

求めた研究報告と、本研究結果を比較した。各濃度で攪拌レイノルズ数が増加するに従い熱伝導率の値は線形的に上昇する傾向が得られた。また、濃度が高くなるにつれ、熱伝導率は低下傾向となった。

さらに、NaCl濃度と熱伝導率の関係をまとめた。その関係から氷膜内においてエタノール、NaClの濃度が低いときNaClの影響は小さいことが考えられた。これはエタノールとNaClの水への溶けやすさが関係しているのではないかと考え、今回の2成分の場合NaClの方が水に溶けやすく、溶け残ったエタノールの溶質が多く氷膜に含まれたのではないかと結論付けた。

参考文献

- (1) 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, 高知工科大学大学院修士論文 (2019)
- (2) 片岡遥渚, 単成分水溶液を用いた氷膜物性値の評価, 高知工科大学大学院修士論文 (2021)
- (3) 岡田眞美: エタノール水溶液を用いた氷膜熱伝導率の評価, 高知工科大学システム工学群卒業論文(2021)
- (4) 塩見理乃: スクロースとNaClの2成分水溶液における氷膜熱伝導率の評価, 高知工科大学システム工学群卒業論文 (2022)