

卒業論文要旨

流動状態における伝熱面の氷膜形状の評価

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1250033 岡 虎太郎

1. 緒論

凍結濃縮は、水溶液を冷却し、純水を凍結させ氷に相変化させる。そして、氷を取り除くことで濃縮液を得る方法である。本研究グループでは凍結濃縮システムの構築を目指している。本システムは主に製氷部、遠心分離機、タンクおよびポンプで構成されている。製氷部においては、伝熱面に氷膜を約 0.5mm 成長させ、これを掻き取り刃で切削することで、水溶液中に氷粒子を浮遊し、スラリーアイスを生成する方式である。製氷部において、水溶液から氷膜を生成すると氷結晶間に水溶液が残存する。これにより、氷膜の熱伝導率が変化し、高精度な製氷部の設計に必要な 製氷能力の試算が困難であることが課題として挙げられる。

そこで、塩見⁽¹⁾は溶質による氷膜性状を評価するため、静止状態にて氷膜形状の観察を行った。本研究は水溶液を流動させた状態にて、氷膜成長が観察可能となる実験装置を自作し、流動状態における氷膜性状の変化について検討を行った。

2. 実験方法

液状食品で多く用いられている糖類、塩分、アルコール類を参考に、スクロース、NaCl、エタノールの単成分水溶液をサンプルとして、氷膜形状の観察を行う。これにより、流動と氷膜生成の関係について調べる。

2.1 実験装置

使用した実験装置を図 1 に示す。

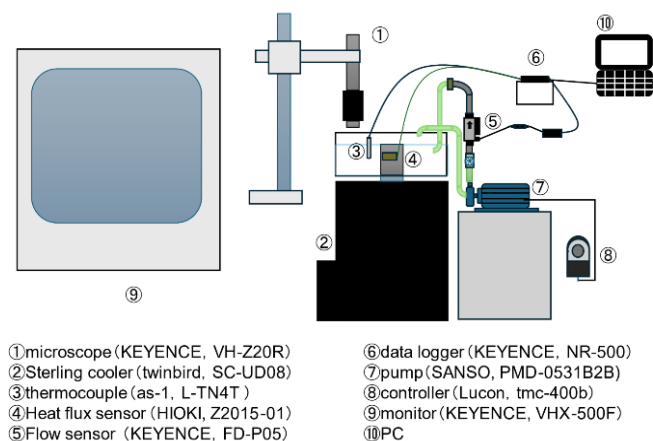


Fig. 1 Experimental Flow

2.2 実験手順

実験条件を表 1 に示す。雰囲気温度 20℃で製氷を行った。静止状態の氷膜形状と比較が行えるよう、水溶液濃度については塩見⁽¹⁾の報告を参考に、10, 20, 30°Brixのスクロース水溶液で実験を行った。また、スクロースと同等の質量モル濃

度となる NaCl 水溶液およびエタノール水溶液をサンプルに実験を行った。

まず、水溶液を冷却部のステンレス容器内に満たす。液面の上部には、気液界面が斜面になり、観察が行えなくなること防止するためにアクリル板の蓋で覆うこととした。またステンレス容器中央の円筒内部にスターリングクーラー(ツインバード, SC-UD08)の吸熱部を挿入し、円筒外側の側面に氷膜を生成させる。そのため、不要な上面に断熱材を取り付け、外部からの侵入熱を防止した。

ポンプ(SANSO, PMD-0531B2B)にて水溶液を円周方向に流動させた。参考文献⁽²⁾と比較が行えるように平均流速は 0.01, 0.02, 0.03 m/s とした。スターリングクーラー(ツインバード, SC-UD08)の電源を入れ冷却を開始し、氷膜厚さが 5mm となったときの氷膜界面形状をマイクロ스코プ(KENSO VHZ-20R)とモニター(KENSO VHX-500F)を用いて撮影した。なお、水溶液冷却時、アクリル板上面に発生する結露を防止するため、エアコンプレッサーを用いて観察部分に乾燥エアを吐出させた。

Table1 Experimental condition

Atmosphere Temperature	20℃
Aqueous Solution	400ml
	Sucrose : 10, 20, 30°Brix
	NaCl : 0.94, 2.09, 3.53wt%
	Ethanol : 1.47, 3.26, 5.46wt%
Average Flow Rate	0.01, 0.02, 0.03m/s
Microscope Magnification	200times
Stirling Cooler Cooling Performance	250W

3. 実験結果

図 2～5 に 20°Brixのスクロース水溶液の静止状態、平均流速 0.01, 0.02, 0.03m/s の氷膜を示す。なお、図示しているグリッドは縦 250μm, 横 250μm である。静止状態の氷膜は針状に形成され、界面には凹凸が形成された。凸部の大きさは縦幅が約 100μmで、横幅が約 50μmであり、凸部の曲率は $0.071\mu\text{m}^{-1}$ であった。平均流速が 0.01m/s の氷膜の界面にも凹凸があった。その大きさは縦幅約 50 μmで、横幅約 80 μmであり、凸部の曲率は $0.024\mu\text{m}^{-1}$ であった。また、平均流速が 0.02m/s の氷膜の界面についても凹凸がみられた。その大きさは縦幅が約 40 μmで、横幅が約 10μmであり、凸部の曲率は $0.014\mu\text{m}^{-1}$ であった。平均流速が 0.03m/s の氷膜界面にも同じく凹凸が見られ、大きさは縦幅が約 10μmで、横幅が約 10μmであり、凸部の曲率は $0.006\mu\text{m}^{-1}$ となった。また、氷膜の界面は少し融解が起きながら成長していた。

静止状態、平均流速が上昇するにしたがい、氷膜の凸部

の大きさが変化し、縦幅が短くなる傾向が得られた。また流速を上げると氷膜の大きさだけでなく界面形状も変化した。静止状態では氷膜は針状に形成されていたため、曲率は最も大きかった。平均流速 0.01m/s では、静止状態より曲率は小さくなり、平均流速 0.02m/s 以上ではさらに曲率が小さくなったため、界面での凹凸部が微小となり、ほとんど見られなかった。

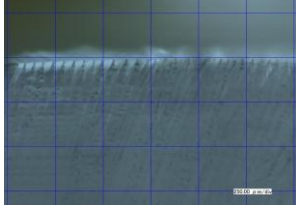


Fig.2 Sucrose 20Brix° Stationary

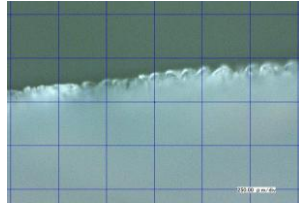


Fig.3 Sucrose 20Brix° 0.01 m/s

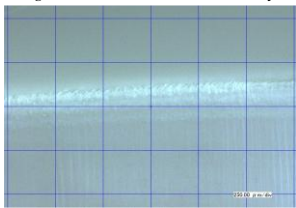


Fig.4 Sucrose 20Brix° 0.02 m/s

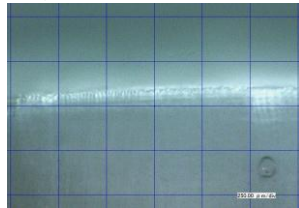


Fig.5 Sucrose 20Brix° 0.03 m/s

図 6～9 に NaCl 水溶液の 2.09Wt% の氷膜を示す。NaCl 水溶液は静止状態、流速 0.01, 0.02 m/s では氷膜の界面に凹凸が形成された。凸部の大きさは静止状態が縦幅約 100 μ m, 横幅約 50 μ m, 曲率 0.071 μ m⁻¹で、0.01 m/s では縦幅約 90 μ m, 横幅約 50 μ m, 曲率 0.057 μ m⁻¹となった。また 0.02 m/s の凹凸は水溶液の流入側にのみ形成され、大きさが異なった。小さいもので 0.01 m/s の凸部と同等の大きさの縦幅約 90 μ m, 横幅約 50 μ m, 曲率 0.057 μ m⁻¹となった。流速 0.03m/s では氷膜の界面に凹凸は形成されなかった。



Fig.6 NaCl 2.09Wt% Stationary

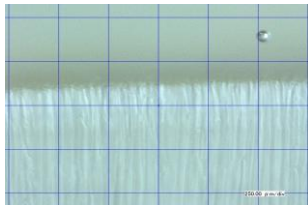


Fig.7 NaCl 2.09Wt% 0.01 m/s

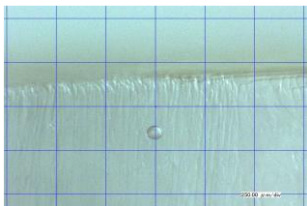


Fig.8 NaCl 2.09Wt% 0.02 m/s

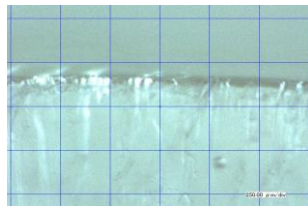


Fig.9 NaCl 2.09Wt% 0.03 m/s

図 10～13 にはエタノール水溶液の 3.26 Wt% の氷膜を示す。エタノール水溶液では、流速 0.01, 0.02 m/s のときのみ氷膜の界面に凹凸が形成された。凸部の大きさは 0.01 m/s で縦幅約 50 μ m, 横幅約 20 μ m, 曲率 0.040 μ m⁻¹となり、0.02 m/s では、縦幅約 50 μ m, 横幅約 20 μ m, 曲率 0.012 μ m⁻¹であった。また、0.03m/s ではスクロース水溶液と同様に、氷膜の成長の際に少しの融解現象が見られた。

水溶液によらず、界面の凹凸は、流速が増すにしたがい、凸部の縦幅の大きさおよび曲率は減少する傾向が得られた。

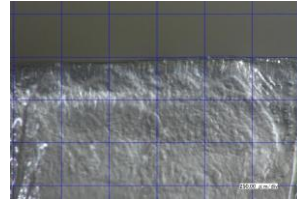


Fig.10 Etanol 3.26Wt% Stationary

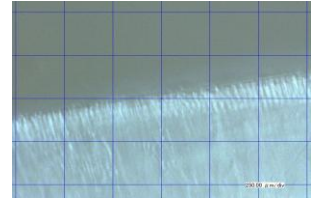


Fig.11 Etanol 3.26Wt% 0.01 m/s

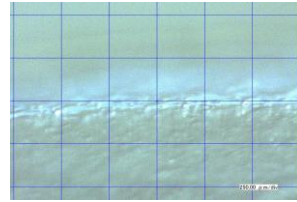


Fig.12 Etanol 3.26Wt% 0.02 m/s

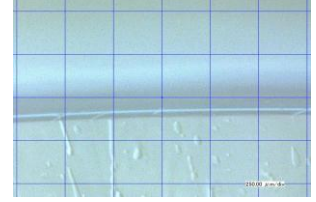


Fig.13 Etanol 3.26Wt% 0.03 m/s

4. 考察

氷膜が凝固と融解を繰り返して、成長していたことから流動状態による水溶液の熱エネルギーに着目する。摩擦損失水頭 h_f [m] は水の運動エネルギーの一部を熱エネルギーに変換する値であり、

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

f : 摩擦損失係数[-] ρ : 流体密度 [kg/m³] Δp : 圧力損失 [Pa]
 V : 断面平均流速 [m/s] L : 管長さ [m] D : 管直径 [m]
 で表される⁽³⁾。

なお、摩擦損失係数 f はレイノルズ数によって決定される⁽⁴⁾。摩擦損失水頭は、管内長さと平均流速の 2 乗に比例し、管直径に反比例する。このことから、平均流速が上昇するほど氷膜が融解する熱エネルギーが増えることになったと考えられる。

また、水溶液の界面の凹凸についてはギブス-トムソン効果⁽²⁾が関係していると考えられる。これは界面の曲率と平衡温度の関係によって、突出部の融点に変化する現象である。曲率が大きいほど突出部の融点は下がる。このことから、本実験結果のように流速が増すにしたがい曲率の変化が起ったものと考えられる。

5. 結論

平均流速を上昇させると氷膜界面の凸部は縦幅が短くなった。また、平均流速 0.03m/s の氷膜成長では凝固と融解を繰り返す現象が見られた。

氷膜の突出部は融点が下がりやすくなっていたため、融解が起きやすく、水の運動エネルギーが生み出す熱エネルギーは流速に依存するため、水溶液の流動により、氷膜の形状は変化する傾向が得られた。今後は流動状態の水溶液別に氷膜のデータ蓄積が必要である。

参考文献

- (1) 塩見理乃, スクロース, NaCl およびエタノールを溶質とする水溶液における氷膜熱伝導率の評価, 高知工科大学大学院修士論文 (2025)
- (2) 福迫尚一郎, 稲葉英男, “低温環境下の伝熱現象とその応用” (1996) pp.81-85
- (3) 國澤正和, 福山和夫, 西田秀行共著, “絵とき水理学” (1998) p.72
- (4) 稲垣仁根・日吉健二, “管路内の流速係数 C の再評 (I - レイノルズ数 Re , 摩擦係数 f と流速係数 C の関係” 日本雨水資源化システム学会 VoL27 No.2 pp43-49