

冷却媒体評価装置の試作と検証

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 野波 昌太

1. 緒論

スラリーアイスとは、平均粒子径が約 0.2mm 程度の微細な氷粒子を水溶液中に混在させた流動性のある液状氷となる^[1]。主に NaCl 水溶液から生成され、魚介類の鮮度保持に利用されている。また、初期塩分濃度と氷充填率 (*Ice Packing Factor*, 以下 *IPF*) によって温度を調整することが可能である。スラリーアイスの課題として、様々な冷却媒体と比較した際、その優位性を定量的に精査が行えていない。これにより、被冷却物が高さ方向に対して存在位置の違いや、*IPF* による冷却性能の違いが品質管理に大きな影響を及ぼす可能性があると考えられる。そのため、冷却媒体の性能評価においては、高さ方向の温度分布や冷却速度を考慮した定量的な比較が重要である。しかし、従来の評価装置では、特定条件下での測定に限られる場合が多く、多様な条件下での比較や高さ方向の詳細な伝熱評価は困難である。そこで、本研究ではスラリーアイスおよび一般的な冷却媒体である氷水を対象とし、高さ方向の冷却評価を定量的に評価することを目的とする。そのために、試験体の高さ調整が可能であり、攪拌や流動化など多様な条件下で測定可能な冷却媒体評価装置を新たに製作した。

2. 実験装置

本研究で用いた自作のスラリーアイス生成装置のフローを図 1 に示す。タンク内の NaCl 水溶液をポンプにより、SUS304 材である二重円筒構造のジェネレーターに送液する。ジェネレーター内の円筒外側を流動する冷媒により円筒内側の伝熱面に氷膜が形成し、回転する掻き取り刃で成長した氷膜を切削する。これにより浮遊した氷粒子を攪拌混合し、タンクに送る。この操作を連続的に繰り返し、タンク内の氷粒子を増加させることで目標の *IPF* まで運転し、スラリーアスを生成する。

スラリーアスを貯蔵する既存のタンクと異なり本研究で製作したタンク(図 2)は、スラリーアスを攪拌、バブリング、流動化でき、試験体の高さ調整が可能である。これにより様々な条件下で冷却媒体による比較を行うことが可能となる。

試験体として、加工が容易である UV レジンを使用し、一辺 25mm の立方体に成型した。試験体上下の面にプレート式 T 型熱電対(東亜電器株式会社, TI-TNT0.127)を設置した。その外周に断熱材(デュボン・スタイロ株式会社, XPS1bc)厚さ 20mm で上の面以外を覆った。断熱材の熱伝導率は $0.028\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[2]のため、上面のみ熱移動しているとして実験を行った。アクリル容器中には水を 10L と試験体 3 つと試験体台を入れる。このとき水面までの高さが 352mm であった。したがって、試験体の上面設置している熱電対を基準に、底面から最も下部に設置された試験体上面と、界面から最も上部に設置された試験体上面の間隔を 50mm で固定した。そして、中部の試験体が中心に来るように 126mm の間隔で図 3 のように固定した。上部から試験体 1、試験体 2、試験体 3 とし、レジンの上面の熱電対を試験体上、下面の熱電対を試験体下とする。

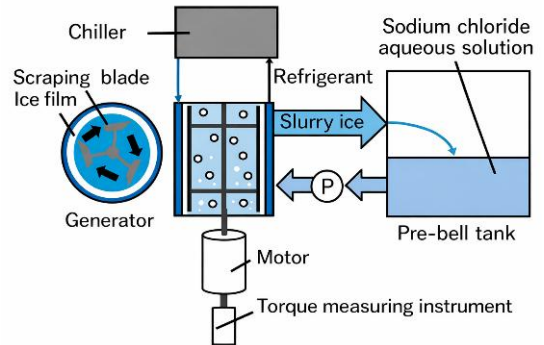


Fig.1 Slurry ice generator

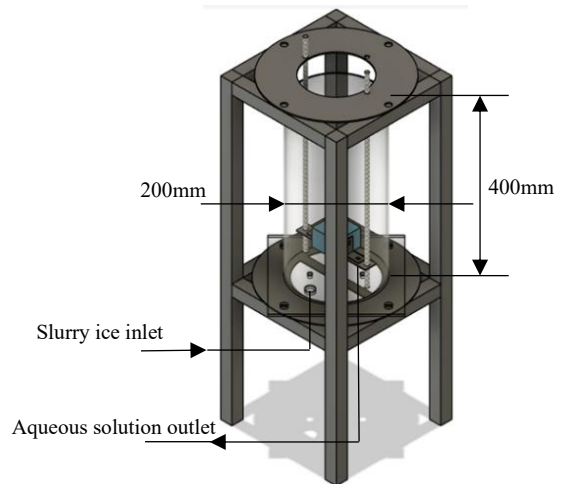


Fig.2 3D model of the experimental apparatus

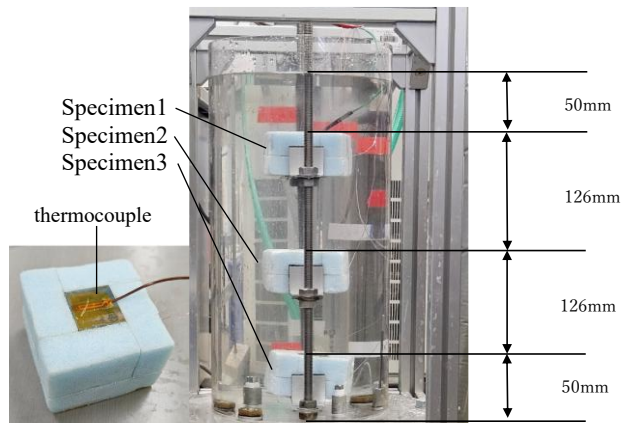


Fig.3 Specimen and specimen placement

3. 実験方法

実験条件を表 1 に示す。生成装置を運転し、目標の *IPF* までスラリーアスを生成する。また、氷水はスラリーアスの各 *IPF* と同じ量の氷と塩分濃度に調整する。そして、計測を開始した後に固定した試験体 3 つを投入し、90 分間測定した。

スラリーアイスの IPF を IPF_S とし、氷水を IPF_I とする。

Table1 experimental conditions

Ambient temperature [°C]	25
measurement time[min]	90
sampling interval[s]	10
IPF [%]	30, 15, 10, 5

4. 実験結果

試験体を入れた状態の測定開始直後の様子を図4に示し、スラリーアイスと氷水 $IPF=30\%$ の各試験体における温度変化と経過時間の関係を図5、図6に示す。 $IPF_S=30\%$ では、試験体1, 2, 3の温度は時間の経過とともに低下し、測定開始から約60分で 0°C 付近まで到達した。 $IPF_I=30\%$ では、試験体1および試験体2の温度は時間の経過とともに低下し、測定開始から約60分で 0°C 付近まで到達した。また、試験体3では温度低下は見られたものの、測定時間内に 0°C 以下に達することはなかった。



Fig.4 Appearance of slurry ice and ice water immediately after the start of measurement ($IPF=30\%$)

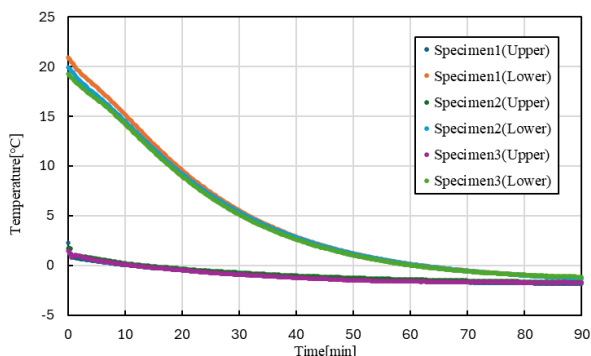


Fig.5 Time variation of surface temperature of the specimen ($IPF_S=30\%$)

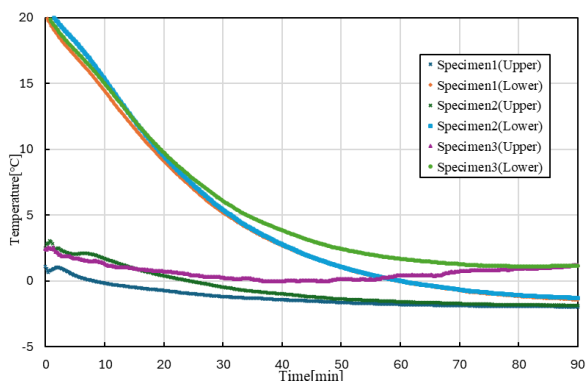


Fig.6 Time variation of surface temperature of the specimen ($IPF_I=30\%$)

5. 考察

フーリエの法則より、各試験体の上面と下面の熱電対の温度差 ΔT とすると熱流束 $q[\text{W}/\text{m}^2]$ は、

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{L} \quad (5-1)$$

と表される。 λ を一定と考え、 $L=0.025\text{m}$ より求めた熱流束の開始から10分までのスラリーアイスと氷水 $IPF=30\%$ を図7に示す。スラリーアイス $IPF_S=30\%$ では、図4のように観測すると容器全体に氷粒子が一樣に存在しているが、試験体の設置高さが低くなるにつれて熱流束が低下する傾向が確認された。これは、浮力により氷粒子が上部へ移動し高さ方向の氷粒子分布の差が生じる。そのため、試験体周囲の氷粒子と試験体表面との接触頻度や接触時間が異なり、結果として試験体の高さによる熱流束の差が生じたものと考えられる。また、スラリーアイスは氷粒子径が約 0.2mm と微小であるため、一般的な氷より被冷却物に対する接触面積が大きい。したがって、全ての試験体においてスラリーアイスが氷水より熱流束の値が大きくなったと考えられる。

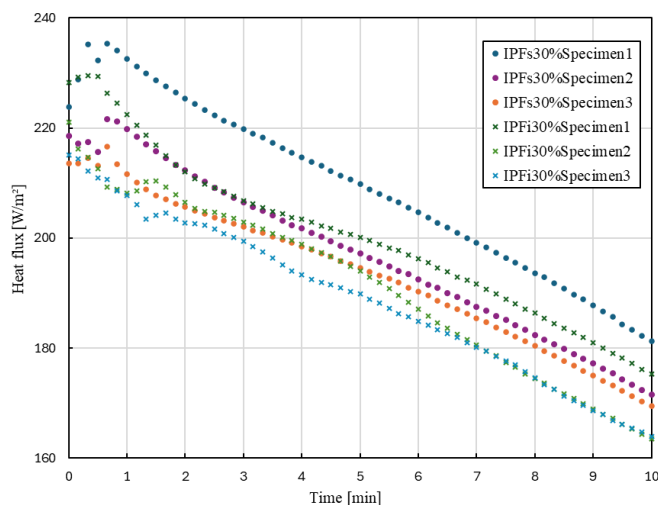


Fig.7 Heat flux comparison between $IPF_S=30\%$ and $IPF_I=30\%$ (0-10 min)

6. 結論

本研究では、スラリーアイスおよび氷水を対象として、高さ方向の冷却特性を定量的に評価可能な冷却媒体評価装置を新たに製作し、試験体の温度変化および熱流束の測定を行った。まず、製作した評価装置により、試験体の高さを任意に調整した状態で冷却実験を行うことが可能となり、冷却媒体中における高さ方向の温度分布および冷却効率を比較できることを確認した。スラリーアイスと氷水を比較した結果、氷が試験体に接しているとき、スラリーアイスは氷水より高い熱流束を示し、冷却性能に優位性が得られた。しかし、その性能は高さ方向に依存する傾向となることが明らかとなった。

以上より、スラリーアイスを冷却媒体として使用する際には、氷充填率だけでなく、被冷却物の配置や高さ方向の氷粒子分布を考慮することが重要である。

参考文献

[1]松本泰典, 横川明, 宇野光世, 北村和之, 岩川三和, “NaCl水溶液を用いた氷スラリー製造装置による製氷能力に関する研究”, MMJ, Vol.124, pp.240-244, 2008

[2] “スタイロフォームの規格”

<https://www.dupontstyro.co.jp/styrofoam/standard.php>
(2025年2月3日閲覧)