

スラリーアイスの氷粒子一様混合に向けた実験的検証

Experimental Validation for Uniform Mixing of Ice Particles in Slurry Ice

航空宇宙工学コース

ものづくり先端技術研究室 1245038 武井 紀江

1. 緒論

スラリーアイスは微細な氷粒子と液体の固液二相混合物であり、主に生鮮魚介類の鮮度保持に用いられる。スラリーアイスの温度帯は液体の初期塩分濃度と氷充填率(以下、*IPF*: *Ice Packing Factor*)で決定される。1.0wt%のNaCl水溶液から $IPF = 20 \sim 30$ wt%のスラリーアイスを生成すると温度は $-0.9 \sim -0.8^\circ\text{C}$ である。魚介類の凍結温度は $-2.0 \sim -1.0^\circ\text{C}$ ⁽¹⁾に多く分布しており、この温度帯のスラリーアイスは凍結させずに低温で保存可能な次世代の冷却技術である。

スラリーアイスの生成装置はタンクとジェネレーターから成る。製氷方法は、まずタンクにNaCl水溶液を溜め、ポンプでジェネレーター内へ送液。ジェネレーター内は二重円筒構造になっており、外円筒と内円筒間に冷媒が流れており、内円筒内にNaCl水溶液が流れる。NaCl水溶液は伝熱面で冷却され氷膜を成形、高速回転している掻き取り刃で氷膜を切削する。このようにNaCl水溶液中に氷粒子が混在した状態にし、再びタンクに送ることでスラリーアイスを生成する。タンクとジェネレーター間を循環させることで、タンク内の IPF を目標の $20 \sim 30$ wt%まで高める。本生成装置の課題として、タンク内でスラリーアイスを攪拌せず静止状態で貯蔵した場合、液面の氷粒子が固い板状の氷層になる⁽²⁾。板状の氷は一度発生すると破壊しにくく、破壊できたととしても大きな氷塊として残る。生成を再開した場合、タンクの送液部や配管内で閉塞の原因になる。従って、スラリーアイスの生成および貯蔵には氷粒子の攪拌が必要であるが、スラリーアイスに最も適している攪拌方法は確立されていない。本研究では氷の融解を抑制できる攪拌の回転速度でスラリーアイスをタンク内に一様混合できる方法の確立を目的としている。

2. 導電率測定のための実験装置および電子回路

2.1 目的

タンク内に氷粒子が一様混合状態であるか確かめるため、導電率に着目した。図1に示す実験装置を作成した。内径110mmの二重円筒構造であり導電率セル(以下、セル)を上部、中部、下部の3ヶ所に設置可能である。また実験装置に接続する電子回路も作成した。実験装置および電子回路が導電率測定に有効か調べた。

2.2 実験方法

塩分濃度 1wt%のNaCl水溶液2Lを実験装置に投入し、チラーで 1°C まで冷却したプロペラ翼で、攪拌の回転速度(以下、回転速度)が $0 \sim 650 \text{min}^{-1}$ の範囲 50min^{-1} 毎に変化させ、そのときの導電

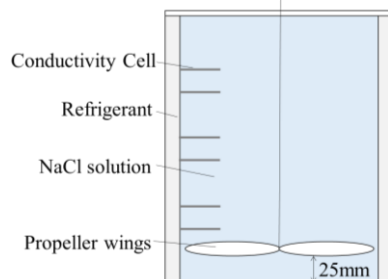


Fig. 1 experimental equipment

率を測定した。導電率の測定時間は30s、サンプリング周期は3sとした。

2.3 実験結果

塩分濃度 1wt%のNaCl水溶液が 1°C のとき、各セルで測定できる導電率と文献値⁽³⁾を図2に示す。回転速度 100min^{-1} 以上では、各セルの導電率 $0.98 \sim 0.99 \text{S/m}$ を示し、文献値 0.98S/m と一致した。

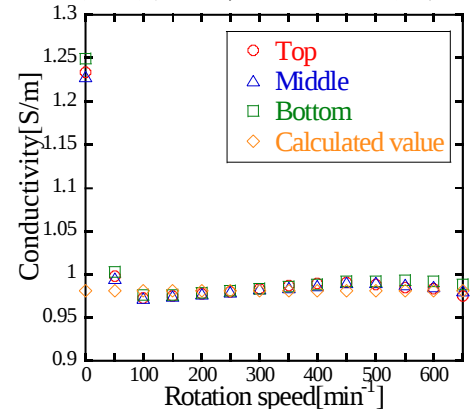


Fig. 2 Conductivity of experimental and literature values

2.4 考察

温度が一定のとき、導電率と塩分濃度は線形的な関係であるため、導電率を塩分濃度 x_T に換算した。さらに式1より初期塩分濃度 x_0 を用いて IPF を算出し、回転速度との関係を図3に示す。

$$IPF[\text{wt}\%] = \left(1 - \frac{x_0}{x_T}\right) \times 10^2 \quad (1)$$

本実験ではNaCl水溶液を使用したため、図3で $IPF = 0 \text{wt}\%$ を示せば正しく測定できている。 100min^{-1} 以上の範囲では最大 IPF 誤差は $1.2 \text{wt}\%$ であり、精度よく測定できた。

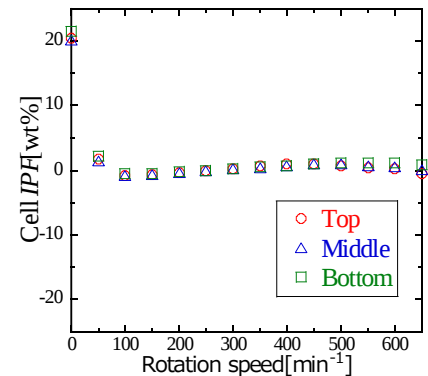


Fig. 3 Relationship between rotation speed and cell IPF

3. 二種類の攪拌翼を用いたスラリーアイス攪拌実験

3.1 目的

有効性が確認できた実験装置を用い、翼形の異なる二種類の攪拌翼でスラリーアイスを攪拌させたとき、氷粒子に対しての攪拌の効果を検証した。攪拌翼は工業的によく用いられるプロペラ翼、パドル翼の二種類を使用した。

3.2 実験方法

スラリーアイス2Lを実験装置に投入し、翼径100mmプロペラ翼またはパドル翼を底面からの高さ25mmに設置する。回転速度 $100 \sim 1000 \text{min}^{-1}$ 範囲を 100min^{-1} 間隔で攪拌させ、そのときの導電率の値 k_T を各セルで測定した。さらに氷粒子が全て溶けたときNaCl水溶液の導電率 k_0 も測定し、式2を

用いてセルIPFを算出した。

$$IPF[\text{wt}\%] = \left(1 - \frac{k_0}{k_T}\right) \times 10^2 \quad (2)$$

3.3 実験結果

プロペラ翼を用いてスラリーアイスを攪拌させたときの、回転速度と各セルIPFの関係を図4に示し、パドル翼を図5に示す。両者とも槽全体のIPFは23wt%だった。図4, 5より低回転では上部のセルIPFが高かった。回転数の増加に伴い、中部および下部のセルIPFは増加した。

3.4 考察

下部のセルIPFが槽全体のIPFに達したときを、氷粒子が一樣混合できた均一浮遊の基準とする。またそのときの回転速度を均一浮遊攪拌速度 N_{Th} とすると、図4よりプロペラ翼では $N_{Th}=700\text{min}^{-1}$ となり、図5よりパドル翼では $N_{Th}=1000\text{min}^{-1}$ となった。プロペラ翼は軸方向に上下流を生じやすいと言われているため⁽⁴⁾、 N_{Th} が低い値となったと考えられる。従って、プロペラ翼はスラリーアイス混合に優れているといえる。ここで完全浮遊について述べる。多くの固液攪拌の文献は完全浮遊を基準としている。完全浮遊とは一粒も液面に1~2秒以上留まっていない状態であり、そのときの回転速度を完全浮遊速度 N_{JS} とする。 N_{JS} は局所濃度と回転速度の関係を調べることで測定できる。 N_{JS} まで局所濃度も回転速度に伴って増加するが、 N_{JS} を超えると濃度の増加割合が小さくなる。プロペラ翼では図4より下部のセルIPFは 700min^{-1} で増加割合が小さくなっている。従って $N_{JS}=700\text{min}^{-1}$ である。

4. 攪拌翼設置位置の検討

4.1 目的

氷粒子の密度は 0.9168g/cm^3 であり、NaCl水溶液より密度が小さいので、静止状態では浮力により上部に多く存在する。これを考慮し、25mmより高く攪拌翼を設置したときの氷粒子分布の変化を調べることを目的とした。

4.2 実験方法

3.2項と同じ方法で行った。攪拌翼は図6に示した高さ75mm, 125mmに設置し、回転速度は $100\sim 800\text{min}^{-1}$ 範囲100 min^{-1} 間隔で攪拌させた。

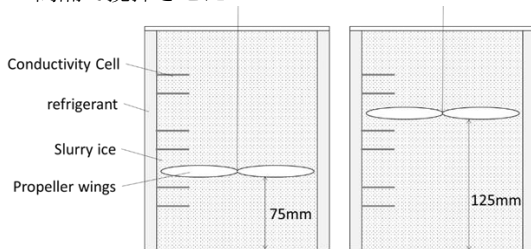


Fig. 6 Experimental device

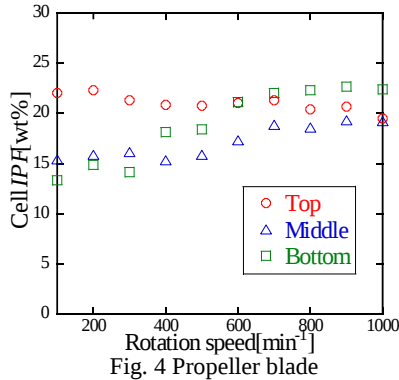


Fig. 4 Propeller blade

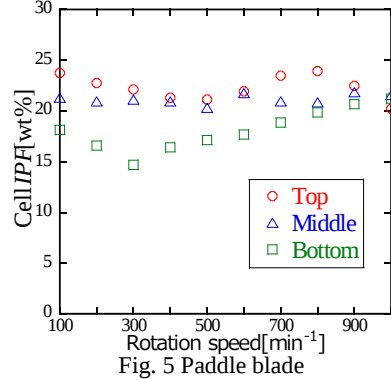


Fig. 5 Paddle blade

4.3 実験結果

攪拌翼を高さ125mmに設置したときの各セルIPFと回転速度の関係を図7に示し、75mmのときを図8に示す。実験は5回行い、図7, 8はその平均値である。図7より攪拌翼を125mmに設置したとき回転速度の増加に伴った下部のセルIPFの増加はなかった。図8より75mmのとき、回転速度の増加に伴う下部のセルIPFの変化はなかったが、上部、中部のセルIPFは 500min^{-1} で大きく増加した。

4.4 考察

図7の攪拌翼設置高さ125mmのとき下部のセルIPFは槽全体のIPFに達さなかったが、図8の設置高さ75mmのときは、攪拌速度 600min^{-1} で達した。ここで平均する前の実験2回分のデータA,Bを抽出し、図9に示す。攪拌速度が低回転のときデータAでは中部のセルIPFが最も小さい。それに対して、データBでは上部のセルIPFが最も小さい。攪拌翼設置高さを25mmから75mmに変更したことで、スラリーアイス投入時に氷粒子が攪拌翼に阻まれ、実験各々で静止時の氷粒子分布状態が異なった。従って、 N_{Th} は平均する前の実験各々のデータをから算出する必要がある。さらに低回転のとき下部のセルIPFが最も小さいとは限らないので、均一浮遊攪拌速度 N_{Th} の基準を上部、中部、下部セルの中で、最も小さいセルIPFを測定した箇所を槽全体のIPFに達したときと改める。第3, 4項で行った実験結果を見直し、新たな基準に準じて N_{Th} を算出し、表1に示す。なお「×」は回転速度を増加させても一樣混合が確認できなかった場合を示している。攪拌翼設置高さ75mmのとき $N_{Th}=540\text{min}^{-1}$ であり、25mmのときは $N_{Th}=720\text{min}^{-1}$ であった。ここで固液攪拌のスケールアップに用いられることが多いフルード数 Fr は攪拌の回転速度 $n[\text{s}^{-1}]$ 、攪拌翼直径 $d[\text{m}]$ および重力加速度 $g[\text{m/s}^2]$ を用いて式3で表される。

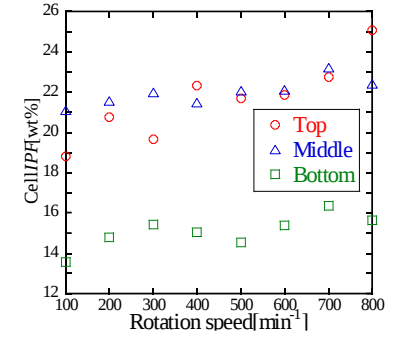


Fig. 7 When the installation height of the stirring blade is 125 mm

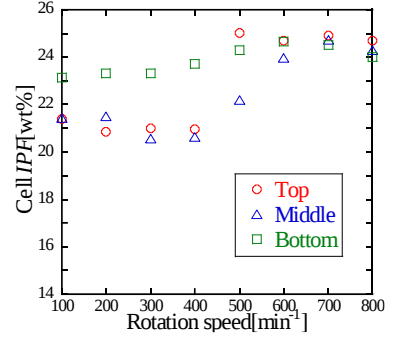


Fig. 8 When the installation height of the stirring blade is 75 mm

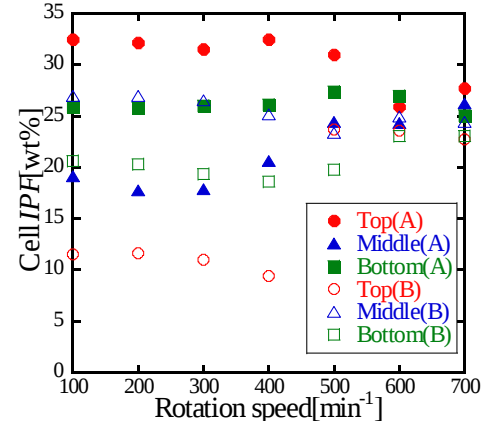


Fig. 9 Relationship between rotation speed and cell IPF in data A and data B

$$Fr = \frac{n^2 d}{g} \quad (3)$$

表1の N_{Th} からフルード数を算出し、無次元攪拌翼設置高さ h/H との関係を図10に示す。翼径100mmのプロペラ翼を無次元高さ0.38に設置した場合、 $Fr > 0.83$ で最も融解を抑えて一様混合できる。無次元高さ0.13に設置した場合でも $Fr > 1.47$ になるよう回転速度を決定すると一様混合できる。

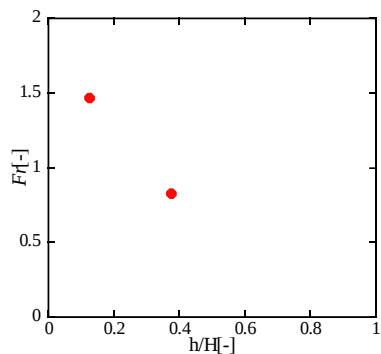


Fig. 10 Relationship between Froude number and dimensionless height

Table 1 N_{Th} that diameter of stirring blade is 100mm

25mm		75mm		125mm	
IPF [wt%]	N_{Th} [min ⁻¹]	IPF [wt%]	N_{Th} [min ⁻¹]	IPF [wt%]	N_{Th} [min ⁻¹]
20.6	700	22.0	600	22	700
21.2	800	24.4	500	23	700
22.7	400	25.0	500	24	×
23.3	1000	26.2	500	25	×
26.2	700	26.8	600	30	×
Average	720	Average	540	Average	700

5. 攪拌翼径の検討

5.1 目的

第3, 4項では槽内径110mmに対して、翼径100mmの大型攪拌翼を使用した。翼径が大きいことにより、氷粒子の上下の移動を妨げている可能性がある。従って、翼径の違いによる氷粒子分布の変化を確かめた。

5.2 実験方法

3.2項と同じ方法で行った。攪拌翼は翼径60mmのプロペラ翼を使用し、高さ25mm, 75mm, 125mmの3パターンで設置した。回転速度は翼径100mmの攪拌翼を用いて100~1500min⁻¹範囲100min⁻¹間隔で攪拌した場合とフルード数が一致するよう決定した。

5.3 実験結果

第4項と同様に平均する前の実験各々の値から N_{Th} を求め表2に示す。表2より翼径60mmの攪拌翼を用いた場合、攪拌翼設置高さを25mm, 75mm, 125mmの3ヶ所いずれに設置した場合でも一様混合できなかった。

Table 2 N_{Th} that diameter of stirring blade is 60mm

25mm		75mm		125mm	
IPF [wt%]	N_{Th} [min ⁻¹]	IPF [wt%]	N_{Th} [min ⁻¹]	IPF [wt%]	N_{Th} [min ⁻¹]
20	×	26	×	25	×
24	×	27	×	26	×
27	×	31	×	31	×

5.4 考察

翼径60mmの攪拌翼を用いた場合、一様混合できなかったことは攪拌渦深さが原因であると考えられる。攪拌実験の際に攪拌渦深さを観察すると、第4項の翼径100mmの攪拌翼を用いた場合、攪拌渦は回転速度が低回転の場合でも発生し、

一様混合できた540min⁻¹($Fr = 0.83$)まで攪拌速度増加させると、攪拌渦深さは攪拌翼にまで達した。同時に氷粒子も攪拌翼にまで達し、攪拌翼と衝突しやすくなったことで、一様混合できたと考えられる。

しかし翼径60mmを用いた場合、回転速度を増加させても攪拌渦が発生することはなかった。これは氷粒子同士が付着し、凝集粒体を形成したからと考えられる。スラリーアイス中の氷粒子は0.2mm以下であり、付着力は粒子径が小さいほど大きい⁶⁾。永田の式より翼径の減少に伴い攪拌所要動力も減少するため、翼径60mmの攪拌翼ではこの付着力を破壊できなかったと考えられる。従って、翼径60mmの攪拌翼を用いてスラリーアイス混合を行った場合でも氷粒子同士の付着を破壊することができれば、 $Fr > 0.83$ で一様混合できると考えられる。

6. 結論

本研究では氷の融解を抑制した回転速度で、スラリーアスをタンク内一様混合できる方法の確立を目的とした。導電率セルを用いてスラリーアスの均一浮遊攪拌速度と完全浮遊速度を測定した。大型プロペラ翼と大型パドル翼を比較すると大型プロペラ翼のほうが均一浮遊攪拌速度は小さい値となった。さらに大型プロペラ翼の設置高さを変更すると、無次元高さ0.38に設置したときが最も均一浮遊攪拌速度が小さい値を得た。小型プロペラ翼では回転速度を増加させても、氷粒子の付着が原因で均一浮遊攪拌速度に達しなかった。従って、氷粒子の融解を抑えて一様混合するためには、タンク内に大型プロペラ翼を無次元高さ0.38に設置し $Fr > 0.83$ で攪拌させることが有効といえる。

参考文献

- (1) 渡辺悦男, 魚介類の鮮度と加工・貯蔵, 1995
- (2) 日本冷凍空調学会, 氷スラリーによる冷蔵・冷却のための手引書, 2016
- (3) JIS K 0130, 電気伝導率測定方法通則, 1995
- (4) 三輪茂雄, 粉体工学通論, 2005
- (5) 嶋崎真一, 和田敏之, 谷口尚司, 攪拌液中における粒子の浮上, 沈降および巻き込み特性, 2003