

# スラリーアイスのダイレクト生成構造に関する研究

## Study on the Structure of Direct Slurry Ice Generator

知能機械システム工学コース

ものづくり先端技術研究室 1215022 永田聡

### 1. 緒論

スラリーアイスとは NaCl 水溶液中に氷粒子が混在した冷却媒体である。先行研究では、塩分濃度 1wt% の NaCl 水溶液からスラリーアスを生成し、魚介類を冷蔵保存することで、鮮度保持に有効であることが明らかとなっている。しかし、従来の生成方法は NaCl 水溶液をタンクとジェネレーター（生成機）の間で循環し、タンク内に氷粒子を増加させる循環方式である。このため、短時間での生成が困難であることに加え、保存時間によってはタンク内で氷粒子の性状が変化するという課題がある。そこで、本研究では、循環方式からタンクを除き、塩分濃度 1wt% の NaCl 水溶液がジェネレーターを通過すると、氷充填率(以下、Ice Packing Factor : IPF)が 25% 以上のスラリーアスを連続的に生成可能なシステムを考案し、これを満足させるジェネレーターの内部構造を確立することを目的とした。

### 2. ジェネレーターの特徴

ジェネレーターは図 1 に示すように製氷部と氷送り出し部で構成され、製氷部は二重円筒になっており、二重円筒間に冷媒を供給することで、内筒内に通過する NaCl 水溶液を冷却し、伝熱面に氷膜を形成させる。下部に設置されたモーターによってシャフトと連結した掻き取り刃とスクリューが回転し、掻き取り刃で氷膜上を切削し、生成した氷粒子をスクリューによって上部へ送り出す。なお、シャフトは製氷部と氷送り出し部の間に設置している軸受けによって支持されている。

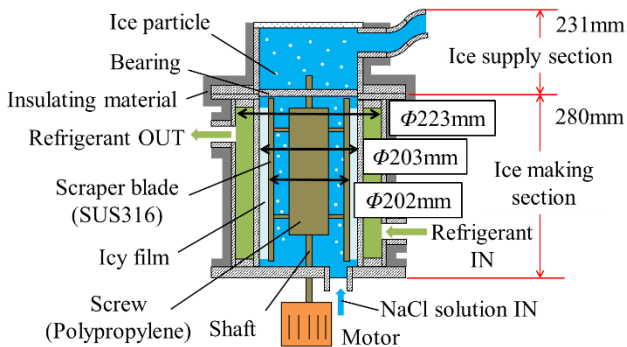


Fig.1 Details of Generator

### 3. 軸受け下流についての検討

#### 3.1 流体解析

##### 3.1.1 解析条件

スラリーアスは固液混合状態であるため、ジェネレーター内の流速差、挙動が氷粒子の固着、蓄積を引き起こし、安定的な生成の妨げになると考えられる。そこで、Solid Works Flow Simulation による流体解析の結果から、ジェネレーター内部の流動状態を把握し、氷粒子の蓄積箇所を予測した。その結果から試作機を改良し、実験を進めることとした。

スラリーアスの物理的特性は不明な点が多いため、本解

析では図 2 に示すように、ニュートン流体である水の物性値を用い、1L/min でジェネレーター内へ流入した。回転領域は製氷部内で、掻き取り刃とスクリューを  $360\text{min}^{-1}$  で回転し、出口の圧力を大気圧に設定した。また、攪拌機構の存在しない氷送り出し部では流速が落ちること、氷送り出し部の上流部に軸受けが設置されていることから、この領域で氷粒子が蓄積すると予測し、図 3 に示すような整流板を搭載し、整流板を搭載していない基本構造との比較を行った。

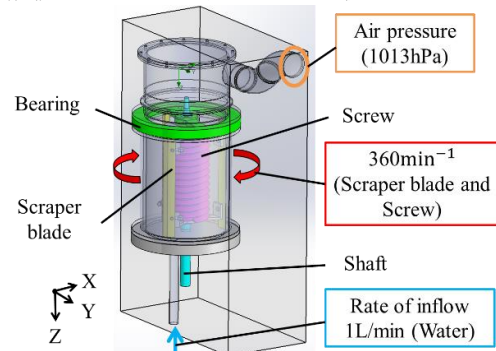


Fig.2 Analysis condition of generator

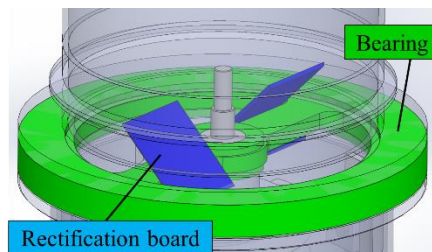


Fig.3 Rectification board on bearing

##### 3.1.2 解析結果

軸受け付近の解析結果を図 4 に示す。基本構造では、製氷部内で発生した旋回流が軸受けによって抑制されていることがわかる。しかし、整流板を搭載することによって旋回流から上下流が発生し、軸受けによる流れの抑制を軽減させ、氷送り出し部内へ流入していることが確認できる。

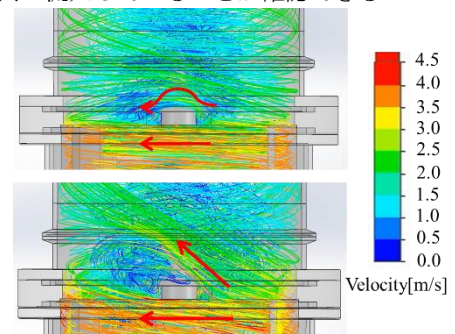


Fig.4 Analysis result

(Above : normal, Below : attached rectification board)

### 3.2 試作ジェネレーターによる実験

#### 3.2.1 実験装置

実験装置は図5に示すように、ジェネレーター、冷凍機、モーター、予冷タンクで構成され、予冷タンクとジェネレーターの間にポンプ、流量調整バルブ、流量センサーを設置した。スラリーアイスの生成システムの操作概要は、予冷タンク内で5°Cまで冷却したNaCl水溶液を一定流量でジェネレーター内に送水し、ジェネレーター内で連続的にスラリーアイスを生産するという流れである。

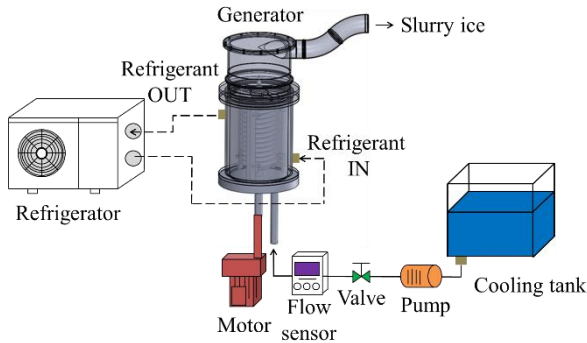


Fig.5 Flow diagram of experimentation

#### 3.2.2 実験方法および条件

解析より明らかとなった整流板による上下流の発生が、ジェネレーター内のスラリーアイスに及ぼす影響について実験的に検証した。

塩分濃度1wt%のNaCl水溶液をジェネレーターに充填した後、冷凍機とモーターを稼動した。このとき、モーターの回転数は $360\text{min}^{-1}$ に設定した。伝熱面に氷膜が形成されてから5分間製氷した後、NaCl水溶液をジェネレーター内へ $1\text{L}/\text{min}$ で送水し、生成されたスラリーアスを5分毎に固液分離し、NaCl水溶液をサンプリングした。サンプリングしたNaCl水溶液の塩分濃度を測定し、スラリーアスを生成する以前、すなわち予冷タンク内のNaCl水溶液の塩分濃度との比によって、式(1)からIPFを算出した。

$$IPF = 100(1 - x_0/x) \quad (1)$$

なお、 $x_0[\text{wt}\%]$ はスラリーアイス生成前でのNaCl水溶液の塩分濃度、 $x[\text{wt}\%]$ はサンプリングしたNaCl水溶液の塩分濃度である。

実験条件は表1に示すように、条件①では基本構造を用い、条件②では軸受けに整流板を搭載した。条件③、④では整流板に加え、軸受け下流部を攪拌するための機構として、シャフト先端部に傾斜パドル、直角パドルをそれぞれ搭載し、掻き取り刃とともに回転させた。試作ジェネレーターの軸受けに整流板を取り付けた様子を図6に示す。

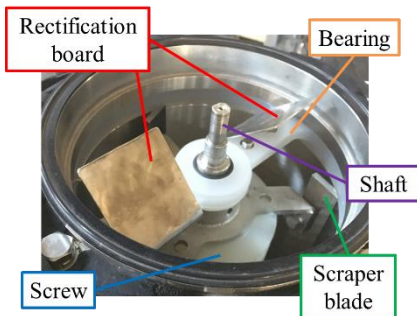


Fig.6 Rectification board in prototype Generator

Table 1 Experiment condition

Condition No.	Rectification board	Paddle
①	×	×
②	○	×
③	○	Slant
④	○	Vertical

#### 3.2.3 実験結果

生成されたスラリーアイスのIPFを図7に示す。全条件で氷粒子の閉塞が発生したが、整流板を搭載した条件②では $IPF \geq 25\%$ のスラリーアスを生成し、他条件の約2倍の時間生成できることがわかった。攪拌パドルにより軸受け下流部を攪拌した条件③と④ではそれぞれ実験開始40分後、45分後に閉塞が発生し、目的を満足させる傾向は得られなかった。なお、冷凍能力は何れの条件においても2.8kW付近で安定していた。

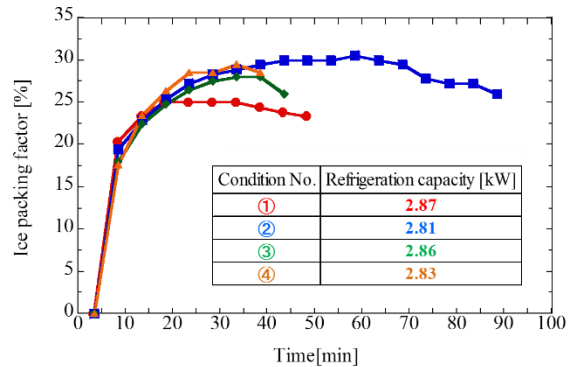


Fig.7 IPF of supplied slurry ice

### 3.3 考察

解析結果より、軸受けに整流板を搭載することで旋回流から上下流が発生し、軸受けによる流れの抑制を軽減する効果があることがわかった。実験結果からは、整流板のみを搭載した条件が他の条件よりも、生成時間を約2倍に延長できることがわかった。これらのことより、整流板による上下流の発生が軸受けによる流れの抑制を軽減することに繋がり、このことが $IPF \geq 25\%$ のスラリーアスを安定的に生成できる方向性を見出したといえる。

### 4. 軸受け位置についての検討

#### 4.1 流体解析

##### 4.1.1 解析条件

軸受けによる流れの抑制を軽減することが、本研究の目的を満足させる方向性を見出した。そこで、図8に示すようにシャフトを伸長することで、支持位置をジェネレーター最上部に変更した内部構造（以下、新構造）を提案し、解析を行った。使用流体は水で流入流量は $1\text{L}/\text{min}$ 、出口配管の圧力は大気圧に設定し、掻き取り刃とスクリーを $360\text{min}^{-1}$ で回転した。

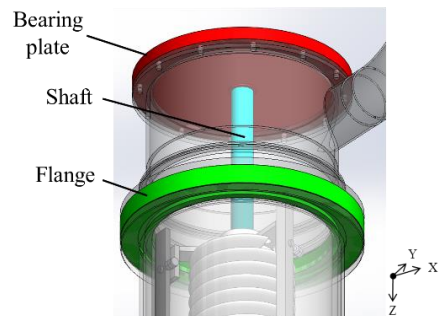


Fig.8 Characteristics of the new structure

#### 4.1.2 解析結果

軸受けを除いたフランジ付近の流動状態は図 9 に示すように、旋回流が滑らかに氷送り出し部内へ流入していることがわかる。また、氷送り出し部内の縦断面における速度分布は図 10 に示すように、新構造において整流板搭載時よりも速度低下を緩和できていることが確認できる。

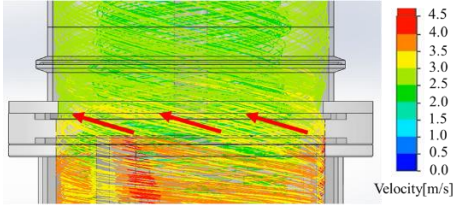


Fig.9 Analysis result

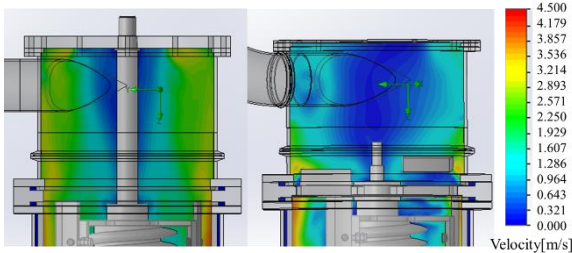


Fig.10 Velocity distribution in ice supply section (left : new structure, right : attached rectification board)

#### 4.2 試作ジェネレーターによる実験

##### 4.2.1 実験条件

新構造がスラリーアイスに及ぼす影響について実験的に検証した。図 11 に示すように試作ジェネレーターの内部構造を新構造に変更し、新構造と整流板を搭載した条件（以下、整流板搭載）で各 3 回ずつ実験を行った。

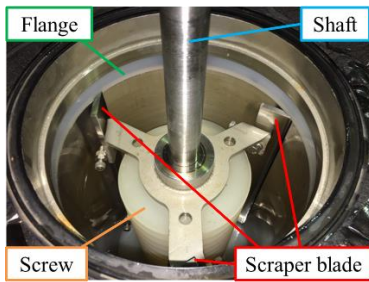


Fig.11 Details of new structure

##### 4.2.2 実験結果

生成されたスラリーアイスの  $IPF$  を図 12 に示す。整流板搭載では実験開始 50 分後に  $IPF$  が低下し始め、その後に閉塞が発生したため実験を終了した。一方、新構造では  $IPF$  の低下および閉塞が発生することなく約 2 時間、 $IPF \geq 25\%$  のスラリーアスを安定的に生成することができた。なお、各条件における冷凍能力は、2.0~2.2kW 付近で安定していた。

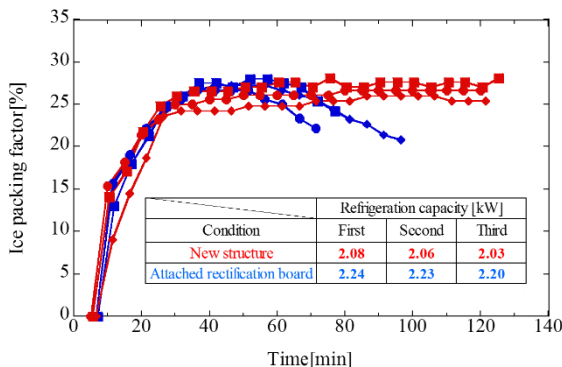


Fig.12 IPF of supplied slurry ice

#### 4.3 考察

解析結果より、新構造では旋回流が滑らかに氷送り出し部内へ流入すること、氷送り出し部内の速度分布が整流板搭載と比較して高くなることが明らかとなった。また、実験結果から新構造で約 2 時間、 $IPF \geq 25\%$  のスラリーアスを安定的に生成することができた。これらのことより、新構造でシャフトの支持位置をジェネレーターの最上部に設けたことで、整流板搭載においてフランジ付近で発生していた旋回流の抑制を解消し、氷送り出し部内の速度低下を緩和したことによって、 $IPF \geq 25\%$  のスラリーアスを安定的に生成することができたと考えられる。

#### 5. 掻き取り刃の回転数による影響

##### 5.1 実験方法および条件

これまでの検証では、流体解析と実験により、シャフトの支持位置をジェネレーターの最上部に設置した新構造が、目的を満たす最適な内部構造であることを示した。しかし、これらは掻き取り刃の回転数が  $360 \text{min}^{-1}$  のみで行ったものである。そこで、掻き取り刃の回転数とスラリーアイスの生成時間および  $IPF$  の関係について実験的に検証した。

ジェネレーターの内部構造は新構造を用いて、掻き取り刃の回転数を  $180 \sim 600 \text{min}^{-1}$  の範囲内で  $60 \text{min}^{-1}$  毎に設定した。実験方法は、氷膜が形成されてから 1 分間製氷した後、NaCl 水溶液をジェネレーター内へ  $1 \text{L/min}$  で送水した。

##### 5.2 実験結果

$180 \sim 360 \text{min}^{-1}$  および  $360 \sim 600 \text{min}^{-1}$  での  $IPF$  時系列をそれぞれ、図 13、図 14 に示す。図 13 での  $180 \sim 360 \text{min}^{-1}$  と図 14 での  $360, 420, 480 \text{min}^{-1}$  では  $IPF$  の低下および閉塞が発生したが、 $540, 600 \text{min}^{-1}$  では  $IPF \geq 25\%$  のスラリーアスを安定的に生成することができた。また、各回転数での生成時間について着目すると、回転数が増加するにつれて、スラリーアイスの生成時間が伸びていることがわかる。なお、 $180 \sim 360 \text{min}^{-1}$  での冷凍能力は  $1.9 \sim 2.1 \text{kW}$  で、 $360 \sim 600 \text{min}^{-1}$  での冷凍能力は  $2.4 \sim 2.6 \text{kW}$  で安定していた。

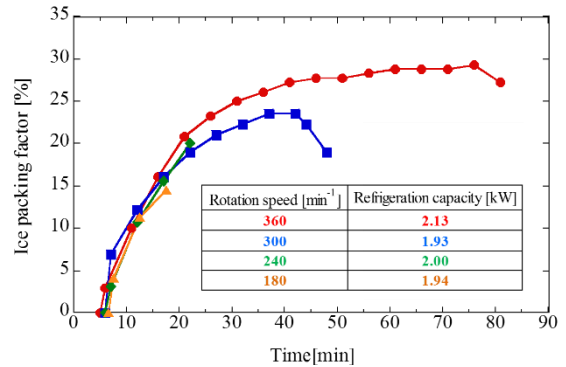


Fig.13 IPF of supplied slurry ice ( $180 \sim 360 \text{min}^{-1}$ )

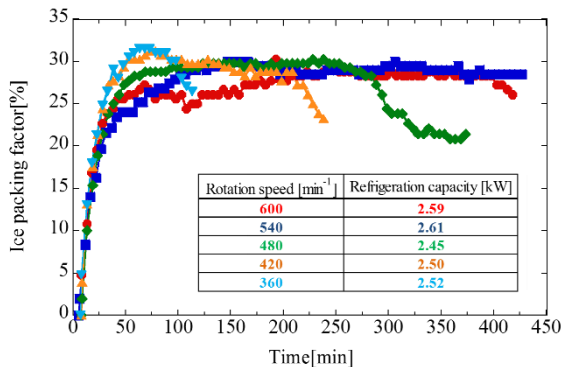


Fig.14 IPF of supplied slurry ice ( $360 \sim 600 \text{min}^{-1}$ )



### 5.3 考察

実験結果より、スラリーアイスの生成時間は掻き取り刃の回転数と正の相関関係にあり、 $540\text{min}^{-1}$ 以上では  $IPF \geq 25\%$  のスラリーアイスを安定的に生成できることがわかった。ここで、回転数別の製氷効率 $\eta$ を式(2)によって算出した。

$$\eta = 100 \frac{\delta}{\gamma} \quad (2)$$

なお、 $\delta[\%]$ は生成されたスラリーアイスの  $IPF$  を時間平均した値、 $\gamma[\%]$ は冷凍能力から試算した  $IPF$  の値で、回転数別の機械的な侵入熱を考慮した式(3)によって算出した。

$$\gamma = \frac{1}{L} \left\{ 6.0 \times 10^6 \frac{(\Phi_o - Q_m)}{\rho_w M_w} - 100S(T_o - T_i) \right\} \quad (3)$$

ここで、 $L[\text{kJ/kg}]$ は氷の融解潜熱、 $\Phi_o[\text{kW}]$ は冷凍能力、 $Q_m[\text{kW}]$ は回転数別の機械的な侵入熱、 $\rho_w[\text{kg/m}^3]$ は水の密度、 $M_w[\text{L/min}]$ は NaCl 水溶液の流入流量、 $S[\text{kJ/kgK}]$ は水の比熱、 $T_o[\text{K}]$ は予冷タンク内の NaCl 水溶液の温度、 $T_i[\text{K}]$ は氷膜生成時のスラリーアイスの温度<sup>(1)</sup>である。

480, 540, 600 $\text{min}^{-1}$ での製氷効率は図 15 に示すように、480 $\text{min}^{-1}$ で 69.2%、540 $\text{min}^{-1}$ で 63.9%、600 $\text{min}^{-1}$ で 59.9% となった。これより、回転数が増加するにつれて製氷効率が低下していることがわかる。製氷効率の算出式には回転数別の機械的な侵入熱を考慮していることから、製氷効率の減少は攪拌による氷粒子の融解が原因であると考えられる。これらにより、掻き取り刃の回転数が増加することで氷粒子の閉塞を防止し、回転数が 540 $\text{min}^{-1}$ 以上では安定的な生成を実現できたが、攪拌による影響で氷粒子が融解し、製氷効率が低下することが明らかとなった。

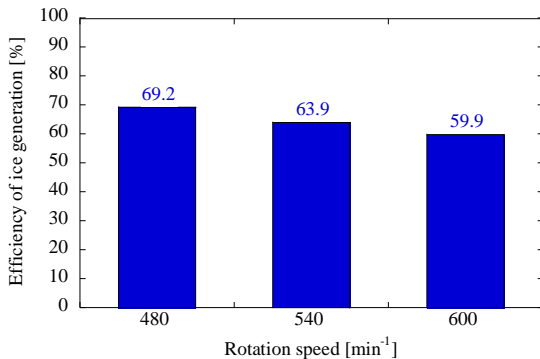


Fig.15 Efficiency of ice generation

## 6. バブリング付与による効果

### 6.1 実験方法および条件

掻き取り刃の回転数とスラリーアイスの生成時間は正の相関関係があるが、回転数が増加することで製氷効率が低下することが明らかとなった。そこで、低回転数での安定的な生成を目的として、ジェネレーターへ圧縮空気を流入し、空気の浮力により氷粒子の分散、均一化を試み、回転数と生成時間および製氷効率の関係について実験的に検証した。

ジェネレーターへの空気の流入流量は、圧縮機から噴出した圧縮空気を流量調整弁によって 40L/min に設定した。掻き取り刃の回転数は、閉塞が発生した 480 $\text{min}^{-1}$ 以下である 480, 360, 330, 300, 240 $\text{min}^{-1}$ に設定し、従来の生成方法（以下、従来法）とバブリング付与（以下、バブリング法）での比較を行った。

## 6.2 実験結果および考察

回転数と生成時間の関係を図 16 に示す。 $IPF \geq 25\%$  のスラリーアイスを安定的に生成可能な回転数に着目すると、従来法では 540 $\text{min}^{-1}$ 、バブリング法では 330 $\text{min}^{-1}$ となっており、ジェネレーター内にバブリングを付与することによって、従来法の 61% の回転数で安定的な生成を可能とした。また、製氷効率は図 17 に示すように 360, 480 $\text{min}^{-1}$ のどちらの回転数においてもバブリング法が従来法を上回る結果となった。これらにより、バブリングの付与により氷粒子を分散、均一化したことで、従来法よりも低い回転数で安定的な生成を実現したことに加え、ジェネレーターへ流入した NaCl 水溶液と伝熱面の熱交換を促進させたことで、製氷効率が増加したと考えられる。

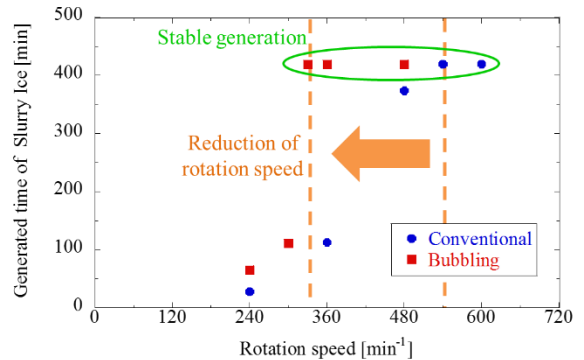


Fig.16 Relationship between rotation speed and generation time

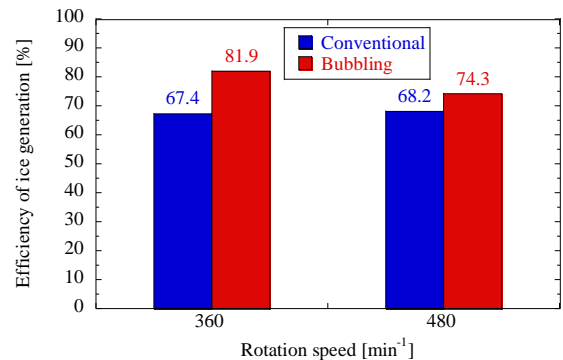


Fig.17 Efficiency of ice generation

## 7. 結言

本研究では、 $IPF \geq 25\%$  のスラリーアイスを安定的に生成可能なジェネレーターの内部構造を確立することを目的とした。流体解析と試作ジェネレーターの実験により、軸受けに整流板を搭載すると、旋回流から上下流が発生することを確認し、これが目的を満足させる傾向であることを明らかにした。この検証を基に、シャフトの支持位置をジェネレーターの最上部に変更すると、旋回流が滑らかに氷送り出し部内へ流入することに加え、氷送り出し部内の速度低下を緩和することが確認でき、 $IPF \geq 25\%$  のスラリーアイスを安定的に生成することを実現した。また、掻き取り刃の回転数とスラリーアイスの生成時間および製氷効率の関係を明らかにし、ジェネレーター内にバブリングを付与することで、従来法の 61% の回転数で安定的な生成が可能であることを明らかにした。

## 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 水溶液を用いた水スラリー製造装置による製氷能力に関する研究 資源・素材学会誌 Journal of MMIJ 2008 4.5 Vol.124