

# スラリーアイスに関する流動特性と評価法の検討

## Investigation of Flow Characteristics and Evaluation Method in Slurry Ice

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 1205038 川嶋 敏生

### 1. 緒言

魚介類に関する日本の食文化は、寿司や刺身などのように生で食べる習慣が広く普及している。このため生鮮魚介類について鮮度保持を行う際、より鮮度を長く保持するための冷却媒体としてスラリーアイスが注目されている。スラリーアイスとは水溶液と微小な氷粒子が混在した液状氷であり、氷スラリー、シャーベット氷など様々な名称がある。本研究ではダイレクト型スラリーアイス生成装置の構造の確立を目指して取り組んでおり、スラリーアイスを生成する際、魚介類が凍結せず、出来る限り低い温度帯で鮮度保持を行うために塩分濃度 1.0wt% の NaCl 水溶液からスラリーアイスを生成し、氷充填率（以下、Ice Packing Factor :  $IPF$ ） $\geq 25\%$  となるスラリーアイスを実験的に供給できる構造を目指している。本構造についての取り組みの中で、シミュレーション解析を行い、構造の確立を目指しているが、シミュレーション解析に必要なスラリーアイスの物性値が把握されておらず、正確なシミュレーション解析を行うことができない。したがって、本研究では粘度測定実験を通して、スラリーアイスの流動特性と評価法について検討を行った。

### 2. 実験方法・算出法

#### 2.1 ポリアミド粒子を用いた粘度測定実験

流動特性の検討を行うためにポリアミド粒子(DANTEC DYNAMICS, PSP-50)を使い、粘度の測定実験を行った。本実験では水と密度がほとんど変わらないポリアミド粒子を用いた実験を行った。ポリアミド粒子の特性を Table 1 に示す。

Table 1 Properties of polyamide particle

Mean particle size	50( $\mu\text{m}$ )
Size distribution	30-70( $\mu\text{m}$ )
Melting point	175( $^{\circ}\text{C}$ )
Refractive index	1.5
Density	1.03( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Particle shape	Close to spherical shape

粘度計は音叉振動式粘度計(エアアンドアイ製, RV-10000A)を使用した。本実験では蒸留水とポリアミド粒子を混在させ、ポリアミド粒子の充填率を 5,10,15,20,25wt% とし、温度を 20 $^{\circ}\text{C}$  一定に保ち実験を行った。本実験より得られた粘度とせん断速度の結果から、せん断応力を算出した。

#### 2.2 Casson 式と Herschel-Bulkley 式による近似

非ニュートン流体に関してシミュレーション解析を用いる際は、せん断速度によって粘度が異なるため、シミュレーション解析を行う対象の流体に関して運動方程式を立てる必要がある。その際に、コーシーの運動方程式(1)の粘性項  $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$  の部分に構成方程式を代入することで、シミュレーション解析を行う対象の流体に関する運動方程式を得られる。構成

方程式を求めるためには粘度やせん断速度を求め、応力偏差テンソル  $\boldsymbol{\tau}$  を求める必要がある。

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho K - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

応力偏差テンソル  $\boldsymbol{\tau}$  を求める数式は粘度測定実験より得られたデータから Casson 式(2)と Herschel-Bulkley 式(3)を用いて近似を行った。

$$\sqrt{\tau} = a\sqrt{\dot{\gamma}} + b \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

ここで、 $\tau$  はせん断応力、 $\dot{\gamma}$  はせん断速度、 $\tau_0$ : 降伏応力である。式(2)は  $a$  と  $b$  の値より  $\sqrt{\tau}$  を  $\sqrt{\dot{\gamma}}$  に対してプロット(キャッソンプロット) <sup>9)</sup> をすることにより求めることができる。式(3)はせん断応力から降伏応力を  $\dot{\gamma}$  に対して引いた値をプロットし、累乗近似を行うことによって  $n$  と  $k$  を求めることができる。

#### 2.3 スラリーアイスを用いた粘度測定実験

現在、 $IPF$  をリニアに測定することは出来ず、粘度測定を行っている際、試料として用いたスラリーアイスがどのような  $IPF$  の値となっているか不明なことや、氷粒子が浮上してしまい、試料内で様にならないことから、自ら  $IPF$  を調整し、スラリーアイスの粘度測定を行うことは困難である。しかし、現在ダイレクト型スラリーアイス生成装置の供給口部分ではスラリーアイスが凝集し、固体のような状態で供給してしまっている。このことから、氷粒子が浮上した状態でのスラリーアイスの粘度測定も必要であると考え実験を行った。粘度計は音叉振動式粘度計を使用した。スラリーアイス採取する際に塩分濃度計(ATAGO PAL-SOLT Mohr)を用いて塩分濃度を測定し、試料となるスラリーアイスはダイレクト型スラリーアイス生成装置の供給口部分から直接採取した。採取したときの NaCl 水溶液の塩分濃度を測定し、粘度測定を行った後に、氷をすべて融解させ、容器内の水溶液の塩分濃度を測定することによって、 $IPF$  を求めた。粘度測定を行う前にはスラリーアイスを手で攪拌し、容器内で氷粒子が均一になるようにした。また、粘度測定を行う際に、試料であるスラリーアイスが外部からの侵入熱によって融解することを防ぐために装置を製作した。音叉振動式粘度計の測定部の機構を図 1 に示す。フロー図を図 2 に示す。

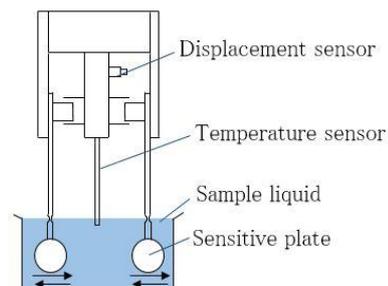


Fig.1 Mechanism of viscosity detector

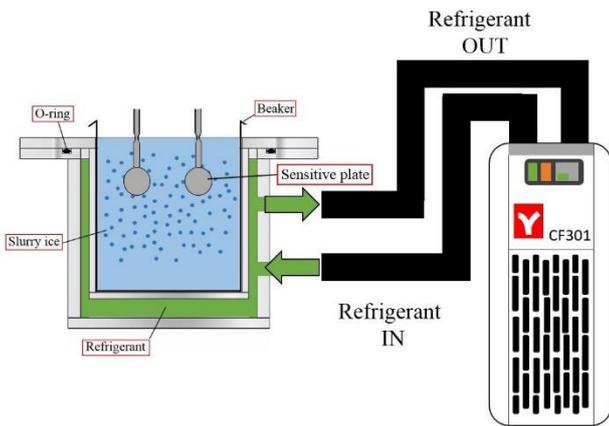


Fig. 2 Flow diagram of experimentation

### 3. 結果

ポリアミド粒子を使った粘度測定の実験の結果を図 3 に示す。粒子の充填率が 5%, 10%, 15 wt% のときはビンガム流体のような流動曲線を示したが、粒子の充填率が 20%, 25 wt% のときは降伏点を持つ擬塑性流体のような流動曲線を示す結果となった。また、せん断速度が大きい範囲では振動子の周りに粒子が凝集し、粘度測定に影響を与え、流動曲線に乱れが生じている。粒子の充填率 25 wt% の流動曲線について近似を行ったところ、Casson 式を用いるとキャッソンプロットにより  $a = 0.8686, b = 50.743$  が求まり、流動曲線は  $\sqrt{\tau} = 0.8686\sqrt{\dot{\gamma}} + 50.743$  という数式が得られ、 $b^2$  である降伏応力は  $50.743^2 = 2574.852$  となった。

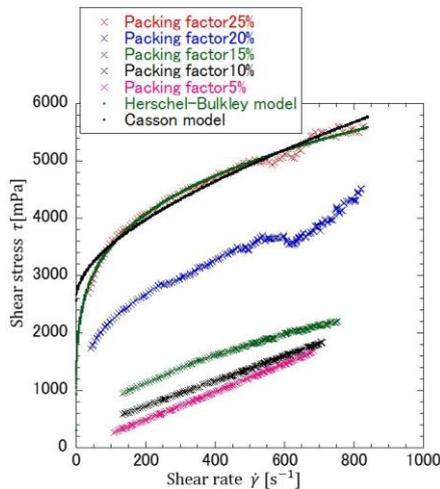


Fig. 3 Flow curve at each packing factor of Polyamide particle

Herschel-Bulkley 式を用いる際、降伏応力を 100mPa から 500mPa まで 100mPa 刻みで代入した結果、降伏応力を 300mPa とした際に最も高い相関が見られ、近似曲線から降伏応力を 300mPa とした際の数式は  $\tau = 300 + 1085.4\dot{\gamma}^{0.23493}$  となる。この数式に関して縦軸にせん断応力 [mPa]、横軸にせん断速度 [ $s^{-1}$ ] とし、プロットした。Casson 式と比較してもせん断速度が低い範囲でも実験結果と同様な曲線を描いている。せん断速度 0 付近ではせん断応力の値が急激に上昇している。

スラリーアイスの実験結果を図 4 に示す。振幅を増加させているときに着目し近似を行ったところ、Casson 式を用いるとキャッソンプロットにより  $a = 0.91106, b = 21.346$  が求まり、流動曲線は  $\sqrt{\tau} = 0.91106\sqrt{\dot{\gamma}} + 21.346$  という数式が得られ、 $b^2$  である降伏応力は  $21.346^2 = 455.652$  となった。また、Herschel-Bulkley 式を用いる際、降伏応力を 100mPa から

500mPa まで 50mPa 刻みで代入した結果、降伏応力を 250mPa とした際に最も高い相関が見られ、近似曲線から数式は  $\tau = 250 + 64.086\dot{\gamma}^{0.50853}$  となった。

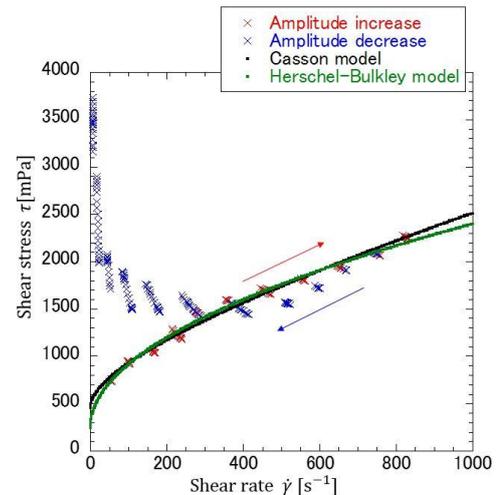


Fig. 4 Flow curve of slurry ice

粘度測定を終えた後に、スラリーアイス内の氷をすべて融解させ、塩分濃度を測定し、*IPF* を求めた結果、*IPF* = 26.7wt% となった。振幅を増加させている間は、ビンガム流体のような挙動を示した。ポリアミド粒子の充填率 25% で粘度測定した際は降伏値を持つ擬塑性流体のような挙動となったが、これはポリアミド粒子の粒子径がスラリーアイスの粒子径に比べ小さく、同じ充填率でも粒子の個数は粒子径の 3 乗に逆比例するため、ポリアミド粒子は振動子周りでの粒子の個数が多くなり、振動子と粒子の接触面積が多くなり、非ニュートン性が増していると考えられる。また、振幅を減少させている間は、氷粒子が凝集し氷塊のようになったため、流動に必要なせん断応力が大きくなったと考える。*IPF* = 25wt% 付近のスラリーアイスに関して、せん断速度が低い値から増加させていく間に、せん断速度が低い間はせん断凝集により氷粒子が凝集していくが、せん断速度を増加させている間に、せん断流れ場によっては分散効果が勝り、氷粒子が分散しているのではないかと考える。

### 4. 結言

本研究ではダイレクト型スラリーアイス生成装置の構造の確立に取り組むために、今回はポリアミド粒子とスラリーアスを試料とし、流動特性の検討を行った。スラリーアスをを用いた粘度測定実験では自ら *IPF* を調整し、スラリーアスを採取することは出来ないが、ダイレクト型スラリーアイス生成装置の供給口でスラリーアスを採取し、そのときの塩分濃度を測定し、粘度測定後に氷を融解させることによって *IPF* を求めた。スラリーアイスではポリアミド粒子のときは異なり、ビンガム流体のような流動特性を示した。スラリーアイスの粒子径がポリアミド粒子の粒子径に比べ大きいことから、同じ充填率でも粒子個数は粒子径に逆比例することから、スラリーアイスはポリアミド粒子に比べ、非ニュートン性の挙動が見られなかった。また、粘度測定を続けていくとせん断凝集によって氷粒子が凝集していくことから、氷粒子が一般的な状態で粘度測定を行うには、攪拌を用い、攪拌の影響に対しての補正をかけるなどの対策が必要である。

### 参考文献

(1) 椿淳一郎, 森隆昌, 佐藤根大士: 基礎スラリー工学