

2017（平成 29）年度 修士学位論文

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

高知工科大学 大学院 工学研究科基盤工学専攻
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

指導教員：松本泰典准教授

目次

第1章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 生鮮魚介類の鮮度保持について.....	1
1.1.2 スラリーアイスの特徴.....	1
1.2 スラリーアイス生成装置について.....	4
1.2.1 循環方式のスラリーアイス生成装置.....	4
1.2.2 ダイレクト型スラリーアイス生成装置全体の概要.....	6
1.3 研究目的.....	8
第2章 方程式の算出.....	10
2.1 氷充填率の算出.....	10
2.2 スラリーアイスについての運動方程式.....	11
2.2.1 実質微分.....	11
2.2.2 コーシーの運動方程式.....	12
2.2.3 構成方程式について.....	14
第3章 実験装置について.....	19
3.1 粘度測定法について.....	19
3.1.1 細管式.....	19
3.1.2 回転式.....	19
3.1.3 音叉振動式粘度計について.....	20
第4章 実験方法と近似.....	24
4.1 ポリアミド粒子を使った粘度測定実験.....	24
4.2 攪拌を用いた粘度測定実験.....	24
4.3 スラリーアイスを使った粘度測定実験.....	25
4.4 Casson 式による近似.....	27
4.5 Herschel-Bulkley 式による近似.....	28
第5章 実験結果.....	29
5.1 ポリアミド粒子を使った粘度測定実験.....	29
5.2 攪拌を用いた粘度測定実験.....	37
5.3 スラリーアイスを使った粘度測定実験.....	38
第6章 結言.....	43
参考文献.....	44
謝辞.....	45

第1章 緒論

1.1 研究背景

1.1.1 生鮮魚介類の鮮度保持について

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おり、さらに最近では生鮮魚介類の生食が、欧米などの海外にも普及してきている。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技術が求められている。

生鮮魚介類の品質の判定法として、生きの良さを表す K 値が有効であるとされている。魚肉中には生体のエネルギー源となる ATP (アデノシン三リン酸) が存在している。魚介類の死後、酵素によって、ADP (アデノシン二リン酸)、AMP (アデノシン一リン酸) と分解されていき、その後、旨み成分 IMP (イノシン酸) が生成される。ここからさらに時間が経過していくと、鮮度に対する劣化成分とされている HxR (イノシン) や Hx (ヒポキサンチン) が生成され、これらの物質は ATP 関連化合物と呼ばれている。ATP 関連化合物の総量に占める HxR と Hx の総量を百分率で表したものを 1959 年に齊藤が K 値と名付けた¹⁾。 K 値を式(1-1)に示す

$$K \text{ 値} = \frac{H_xR + H_x}{ATP + ADP + AMP + IMP + H_xR + H_x} \times 100 \quad (1-1)$$

にて表すことができる。この K 値は魚種によっても若干異なるが、一般的には刺身などの生鮮魚介類では 20%以下であることが望ましく、20~60%では加熱調理した方が良いとされ、60%以上では食不適といわれている。一般的に動物の持つ酵素は 35~50°Cが至適温度であり、反応速度は至適温度以下では温度が 10°C上昇すると、反応速度はおおよそ 1.5~2.5 倍上昇するといわれている²⁾。したがって、生鮮魚介類を鮮度良く保持するには、より低温にて酵素による分解の速度を遅延させることである。

1.1.2 スラリーアイスの特徴

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。魚介類が凍結する温度は、Table 1-1 に示すようにおおよそ -2~-1°Cに分布している。これに対し、スラリーアイスの温度は溶液の濃度と氷充填率によって決定される。Table 1-2 に示すように NaCl 水溶液から生成されたスラリーアイスは塩分濃度が 1.0wt%を超えると、-1°Cより低い温度帯となり、魚介類が凍結してしまうが、塩分濃度 1.0wt%の NaCl 水溶液を用いて氷充填率 20~30%のスラリーアイスを生成すると、スラリーアイスの温度を-0.9~-0.8°Cにすることができる。それに加え、1.0wt%の NaCl 水溶液から生成されたスラリーアイス(粒径 0.2mm)を Fig.1-1 に示すように、氷粒子を球体として考えると単位体積あたりの比表面積 S_V [m^{-1}]は直径 D [m]に対して $S_V = 6/D$ で求められる。そのため粒子径が小さいスラリーアイスは、同体積の氷に対して表面積が大きくなり、

周囲との熱交換が多くなり融解が起きやすくなる。そのため、氷粒子が融解する潜熱を利用して魚介類の凍結直前の温度にまで急速に冷却することができる。また、球形の氷粒子であるため魚介類を傷めることなく保存をし続けることができる。

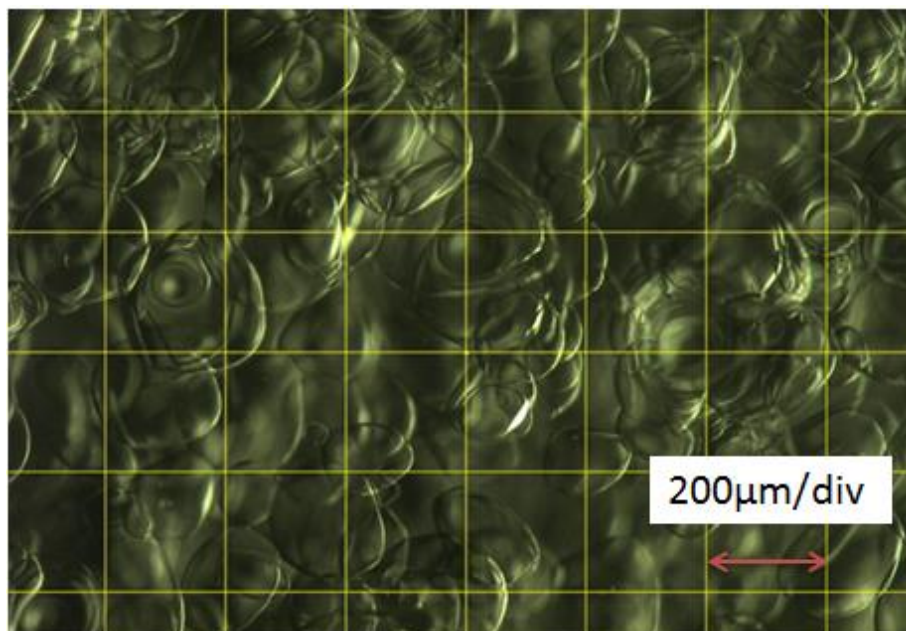


Fig.1-1 Enlarged picture of slurry ice

Table 1-1 Freezing temperature of fish

Species	Freezing point (°C)	Species	Freezing point (°C)
Cod	-1.0	Flounder	-1.3
Mackerel	-1.0	Red snapper	-1.5
Horse Mackerel	-1.0	Eel	-2.0
Yellowtail	-1.2	Kalei	-2.0
Tuna	-1.3	Bonito	-2.0
Sanma	-1.3	Crab	-2.0
Sardine	-1.3	Squid	-2.3

Fish freezing point is around -1~-2°C

Table 1-2 Initial salinity of sodium chloride solution, Relationship *IPF* with temperature of slurry ice

Concentration (wt%)	Ice packing factor (IPF) : %					
	0	10	20	30	40	50
3.5(Sea water)	-2.2	-2.5	-2.8	-3.2	-3.7	-4.5
3.0	-1.9	-2.1	-2.4	-2.7	-3.2	-3.8
2.5	-1.6	-1.8	-2.0	-2.3	-2.6	-3.2
2.0	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-2.1	-2.5
1.5	-1	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6	-1.9
1.0	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.1	-1.3
0	0	0	0	0	0	0

: Slurry ice fluidity range (IPF Max.30%)

: Slurry ice temperature -1°C or higher

一例として、高知県の名産であるマルソウダガツオを用いた鮮度実験の結果を Fig.1-2, Fig.1-3 に示す.

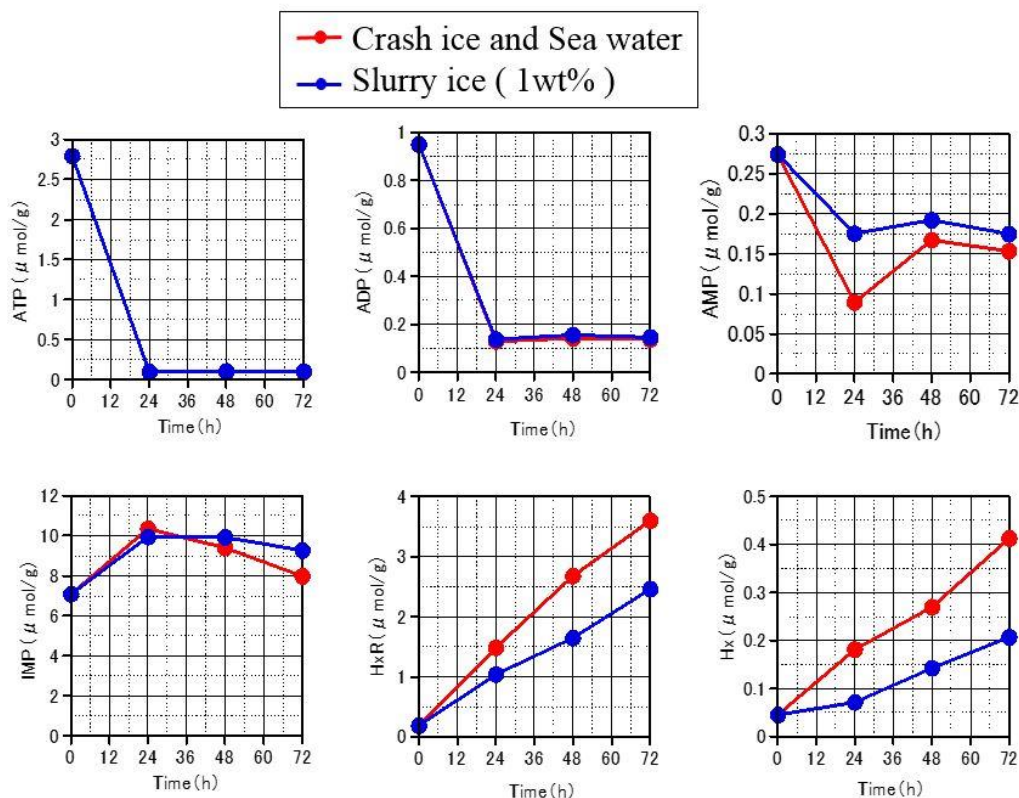


Fig.1-2 Change of ATP and related compounds after the death of *Auxis rochei*

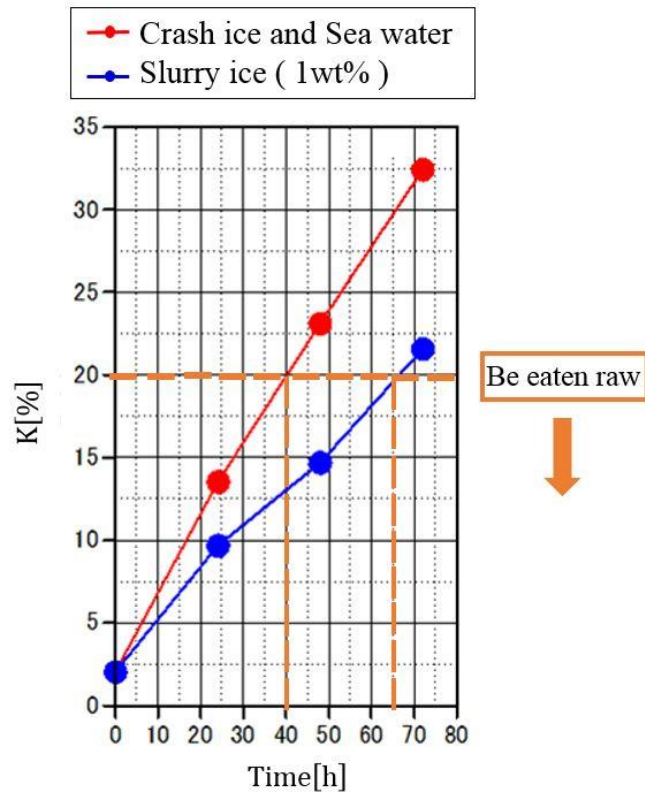


Fig.1-3 Comparison of K values of *Auxis rochei* preserved in seawater ice, slurry ice

1.2 スラリーアイス生成装置について

1.2.1 循環方式のスラリーアイス生成装置

循環型のスラリーアイス製造装置の外観と内部構造について Fig.1-4, Fig.1-5 に示す.

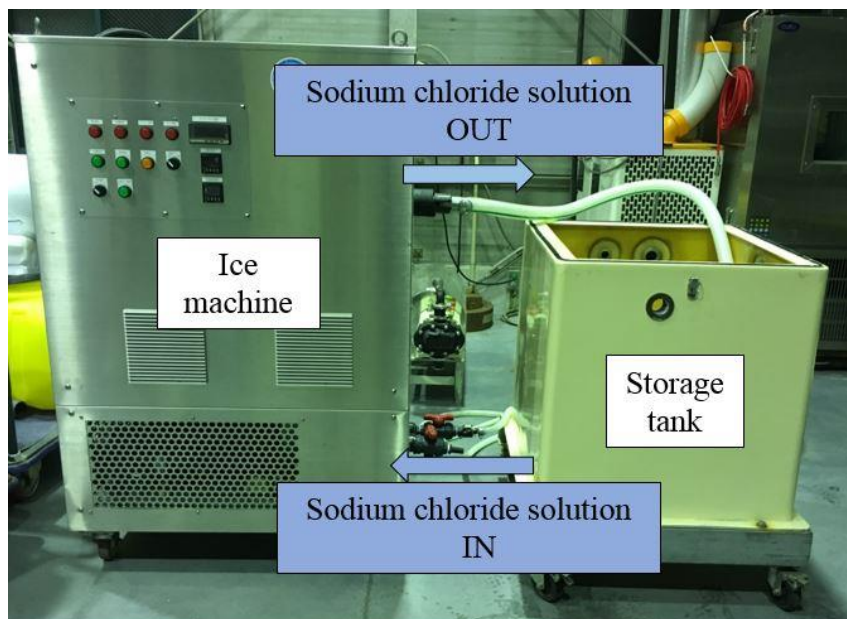


Fig.1-4 Appearance of circulation type slurry ice generator

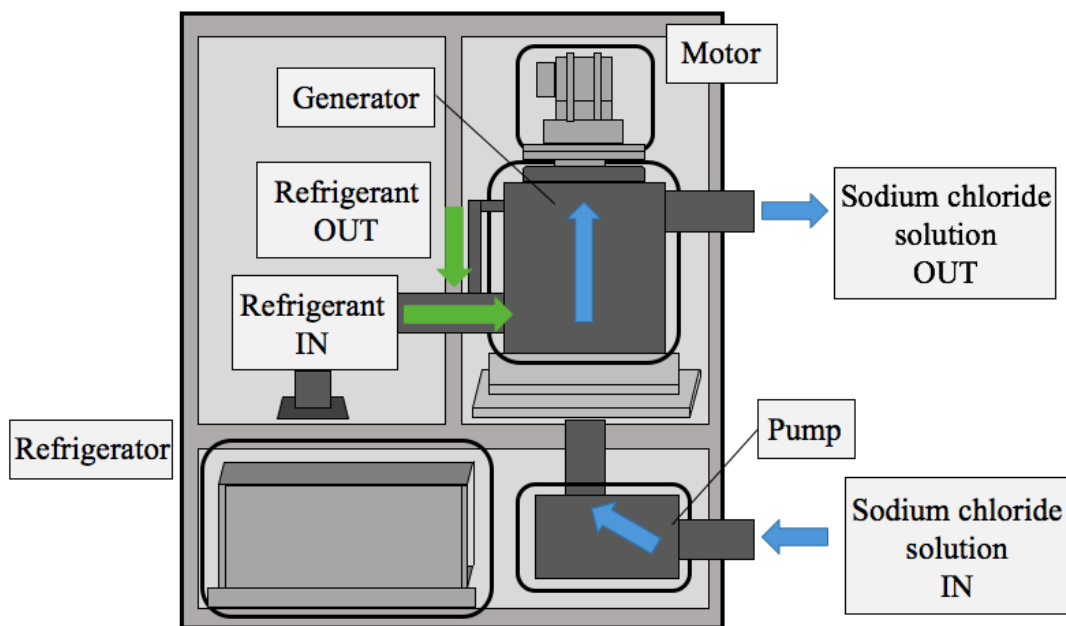


Fig.1-5 Internal structure of circulation type slurry ice generator

塩分濃度 1wt%の NaCl 水溶液を貯蔵タンクと製氷機で循環させることによって貯蔵タンク内に氷粒子を増加させていく方式である。ジェネレーターの内部構造は二重円筒構造となっており、二重円筒の内筒内に掻き取り刃があり、モーターの駆動力によって回転する。二重円筒間には冷媒が循環しており内側の伝熱面を冷却し、内筒内にはポンプによって NaCl 水溶液を通過させている。時間が経過すると、内筒の壁面に氷膜が形成され、その形成された氷膜を掻き取り刃によって連続的に掻き取り、NaCl 水溶液中に氷粒子を浮遊させ、スラリーアイスとして生成し供給する。循環方式でのスラリーアイスを生成した場合、貯蔵タンク内に塩分濃度 1wt%の NaCl 水溶液を 100L 溜め、ジェネレーターによって生成されたスラリーアイスの氷充填率（以下、Ice Packing Factor : *IPF*）が Fig.1-6 となる。この結果により、循環方式のスラリーアイス生成装置から 100L の NaCl 水溶液からスラリーアイスを生成した場合、スラリーアイスの *IPF* を 25%まで上昇されるまでに 2 時間以上要する。また、循環方式のスラリーアイス生成装置でスラリーアイスを生成する場合、使用する最大量を想定した容量を確保しなければいけないため、必要量のみのスラリーアイスを生成することができないことに加え、タンク内に貯蔵するスラリーアイスの量が増加するにしたがい貯蔵時間が長くなってしまいう傾向がある。したがって、タンク内で貯蔵時間の長くなってしまいうことから、オストワルド・ライプニングにより、氷粒子径が増大した粒子群となる。また、貯蔵している際に外部からの侵入熱の影響を大きく受けてしまうと、氷粒子の融解、再凝固から氷粒子が結合してしまい、タンク内でスラリーアイスの性状を維持することが

困難になってしまう³⁾。

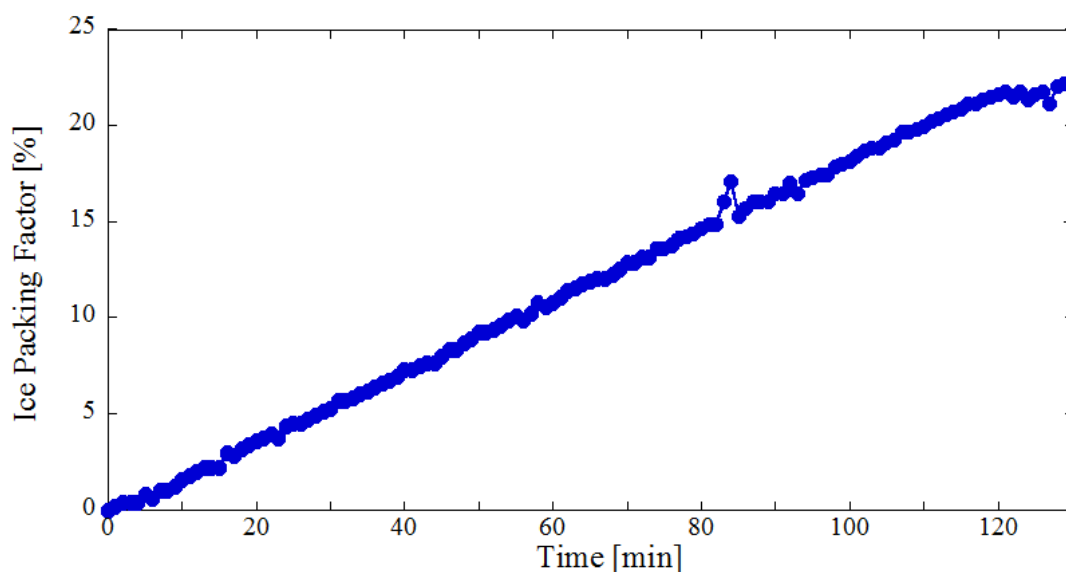


Fig.1-6 Time course of *IPF* in the tank by circulation type slurry ice generator

1.2.2 ダイレクト型スラリーアイス生成装置全体の概要

ダイレクト型スラリーアイス生成装置はジェネレーター、冷凍機、モーター、予冷タンクからなり、予冷タンクとジェネレーターの間にはポンプ、流量センサー、バルブを搭載している。Fig.1-7に実験装置の全体フロー、Fig.1-8に上部から見たジェネレーター内部の断面図、Fig.1-9に側面から見たジェネレーター内部の断面図を示す。製氷部は二重円筒になっており、二重円筒間に冷媒が循環し、タンク内のNaCl水溶液をポンプによってジェネレーター内に送水することによって二重円筒内部にNaCl水溶液が通過する。流入したNaCl水溶液は冷媒によって冷却され、伝熱面に氷膜が形成される。モーターによって掻き取り刃とスクリーが回転し、掻き取り刃で氷膜を掻き取ることによって、スラリーアスを生成し、外部へ供給するという仕組みになっている。循環方式のスラリーアイス生成装置の課題点から、必要量のスラリーアスを短時間で生成し、性状を維持したままスラリーアスを提供することが必要である。ダイレクト型スラリーアイス生成装置ではスラリーアスを貯蔵するタンクがなくなり、NaCl水溶液がジェネレーターを通過すると $IPF \geq 25\%$ のスラリーアスを生成し、性状を維持したまま安定して生成し続けることが出来ると考えられている。また、本システムは、貯蔵タンクの容積に制限されず、大型化、大量生産も見込まれ、本システムを構築するにあたって、ジェネレーターの内部構造を確立することが重要なテーマとなっている⁴⁾。

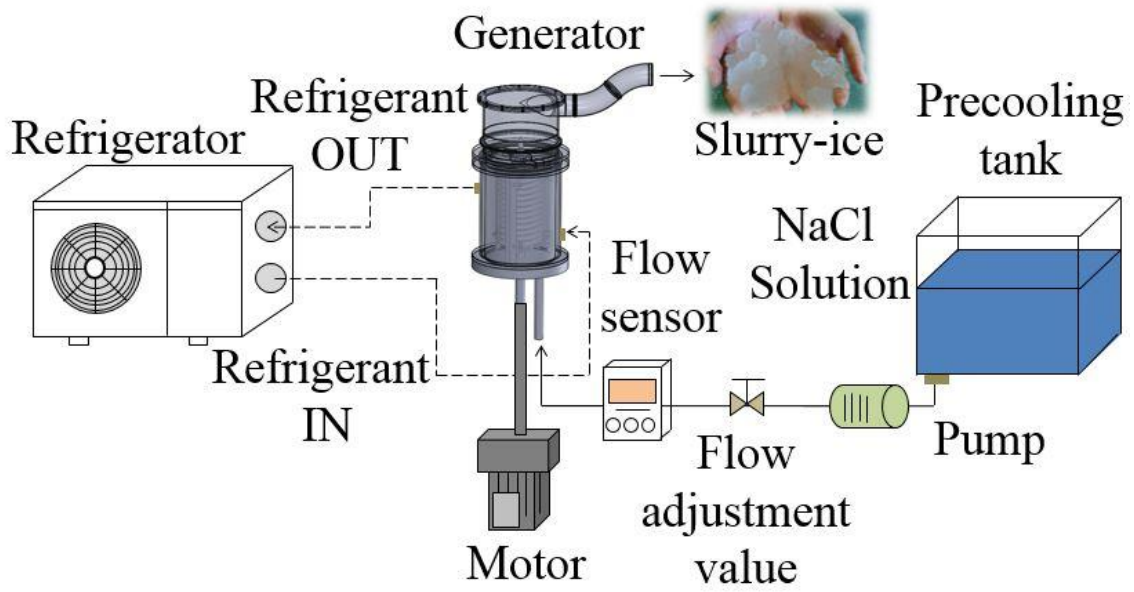


Fig.1-7 Flow diagram of direct type slurry ice generator

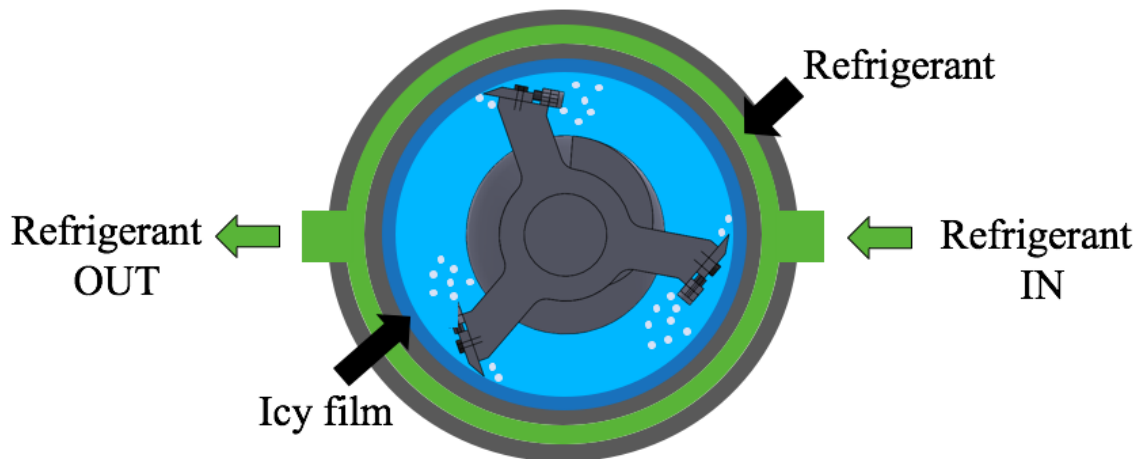


Fig.1-8 Internal structure of generator viewing from the top

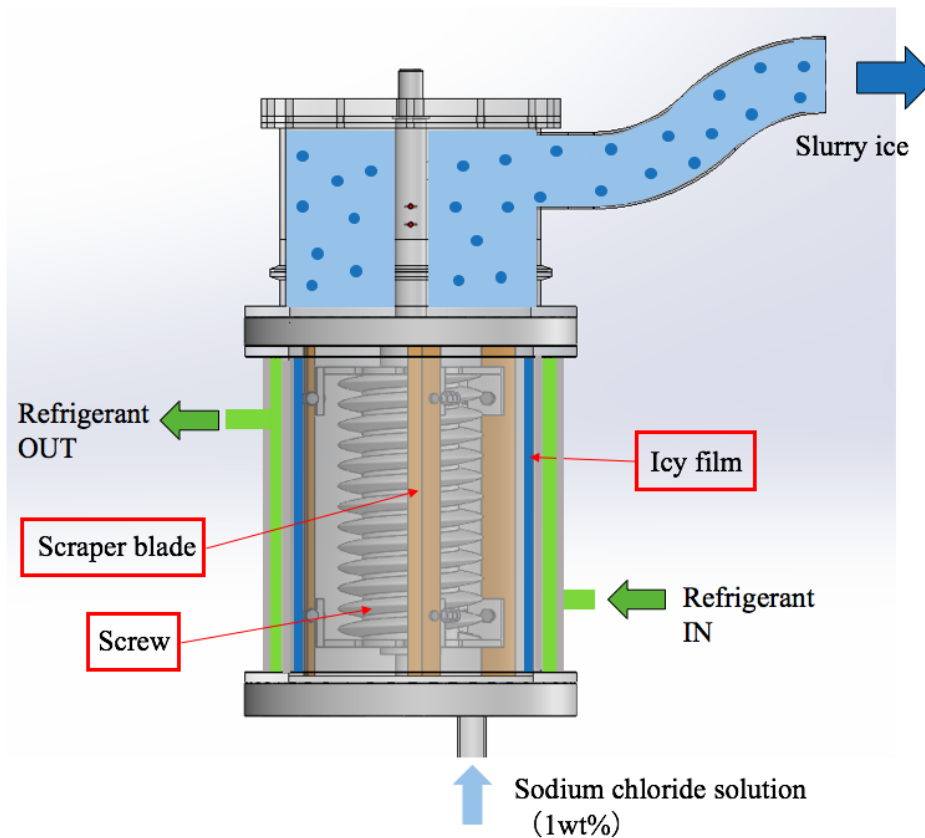


Fig.1-9 Internal structure of generator viewing from a side face

1.3 研究目的

現在、ダイレクト型スラリーアイス生成装置の内部構造の確立を行っていく際に、Fig.1-10のようにシミュレーション解析を行っている。現在、シミュレーション解析を行う際は、ニュートン流体である水がジェネレーター内を流れていると仮定し、シミュレーション解析を行っている。しかし、実際のジェネレーター内を流れている流体は非ニュートン流体であるスラリーアイスであるため、シミュレーション解析の結果と実際のジェネレーター内の流動状態に大きな誤差が出てしまうと考えられ、正確なシミュレーション解析を行うことが出来ていない。実際に、スラリーアイスがジェネレーター内を流れているとし、シミュレーション解析を行いたいが、スラリーアイスの物性値が把握されておらず、シミュレーション解析を行うことが出来ない。したがって、本研究では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。

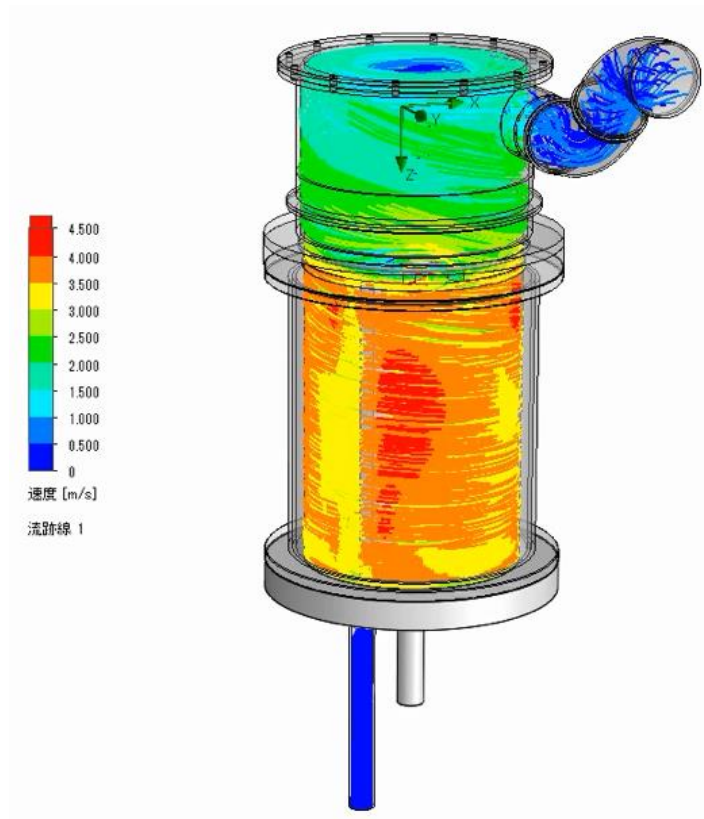


Fig.1-10 Simulation analysis of water

第2章 方程式の算出

2.1 氷充填率の算出

氷充填率(*IPF*)とは、スラリーアイス内に占める氷粒子の割合である。NaCl 水溶液の塩分濃度（以下、初期塩分濃度）を x_0 (wt%)とすると、

$$x_0 = \frac{100a}{(A_0 + a)} \quad (2-1)$$

で表される。ここで、NaCl 水溶液中の水の質量を A_0 (kg)、NaCl の質量を a (kg)である。 A_0 について展開すると、

$$A_0 = \frac{100a}{x_0} - a \quad (2-2)$$

となる。スラリーアイスが生成されると、氷粒子は純水であることから NaCl 水溶液の塩分濃度は x (wt%)となり、

$$x = \frac{100a}{(A + a)} \quad (2-3)$$

から求められる。ここで、NaCl 水溶液中の水の質量は A (kg)であり、 A について展開すると、

$$A = \frac{100a}{x} - a \quad (2-4)$$

となる。また、スラリーアイス中の氷粒子の質量を α (kg)とすると、水の質量は、

$$A = A_0 - \alpha \quad (2-5)$$

とおける。ここで、*IPF* はスラリーアイスの氷粒子の割合であるから、

$$IPF = \frac{100\alpha}{A + a + \alpha} \quad (2-6)$$

と表される。ここで、式(2-5)と(2-6)より

$$IPF = \frac{100\alpha}{A_0 + a} \quad (2-7)$$

となる。ここで、式(2-2)、(2-4)、(2-5)及び(2-6)より氷粒子の質量は、

$$\alpha = \frac{100a}{x_0} \left(1 - \frac{x_0}{x}\right) \quad (2-8)$$

で表すことができる。式(2-7)、(2-8)より、

$$IPF = 100 \left(1 - \frac{x_0}{x}\right) \quad (2-9)$$

となり、*IPF* はジェネレーター内に流入する前の NaCl 水溶液の塩分濃度と生成されたスラリーアイスの塩分濃度の関係で表される⁴⁾。

現在、用いられている *IPF* の測定は供給されたスラリーアイスを試験管にサンプリングし、塩分濃度を測定するサンプリング方式により行っている。塩分濃度計は ATAGO PAL-SOLT Mohr を用いた。Fig.2-1 に示すようにスラリーアスをサンプリングする際に漏斗とろ紙を用いて氷粒子と NaCl 水溶液を固液分離し、溶液温度を 5.0℃以上にする。これは、塩分濃度測定にはスラリーアスの NaCl 水溶液だけが必要で、さらに塩分濃度計の規格により測定可能な溶液温度が 5.0～100℃の範囲であるためである。

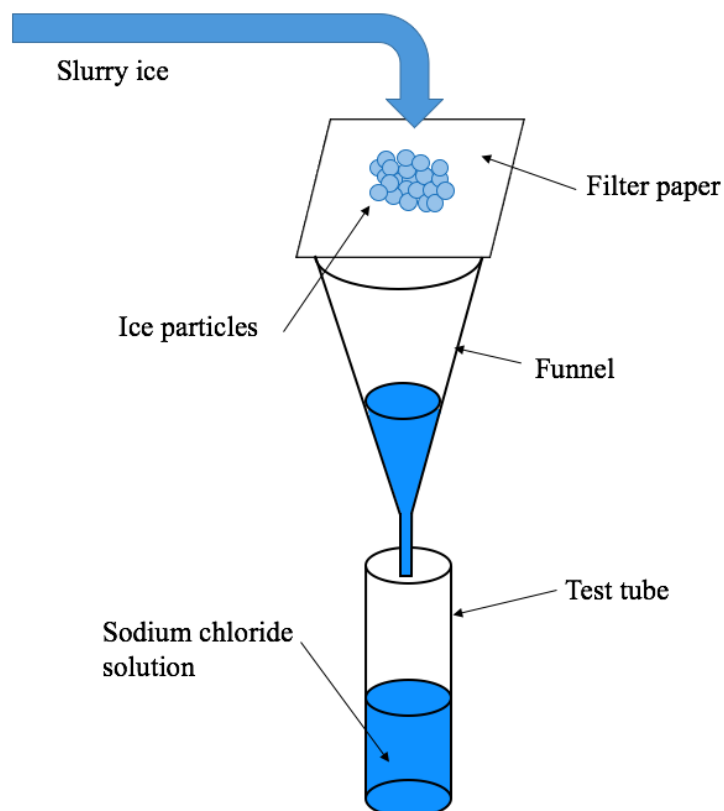


Fig.2-1 Sampling method of slurry ice

2.2 スラリーアイスについての運動方程式

2.2.1 実質微分

流体のシミュレーション解析において個々の流体粒子に着目し、シミュレーション解析を行うことは困難である。そのため、流体力学では観測位置を固定し、各時刻にそこに存在する流体粒子について観測を行うオイラーの方法がよく使われる。オイラーの方法では Δt 秒後に別の流体粒子を観測することになるので、位置の変化をも考慮に入れた時間微分を考える必要がある。

流体粒子が持つある物理量を $G(t, \mathbf{x})$ とする。 $t \rightarrow t + \Delta t$ のとき粒子は運動しているので $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}$ となることから $G(t + \Delta t, \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})$ となる。従って、 $G(t, \mathbf{x})$ の時間変化は

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{G(t + \Delta t, \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) - G(t, \mathbf{x})}{\Delta t} \quad (2-10)$$

となる。 $G(t + \Delta t, \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})$ をテーラー展開すると

$$G(t + \Delta t, \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = G(t, \mathbf{x}) + \frac{\partial G}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial G}{\partial x} \cdot \Delta \mathbf{x} + \dots \quad (2-11)$$

となるので式(2-10)に式(2-11)を代入すると

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{G(t + \Delta t, \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) - G(t, \mathbf{x})}{\Delta t} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{G(t, \mathbf{x}) + \frac{\partial G}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial G}{\partial x} \cdot \Delta \mathbf{x} + \dots - G(t, \mathbf{x})}{\Delta t} \\ &= \frac{\partial G}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial G}{\partial \mathbf{x}} \end{aligned} \quad (2-12)$$

となる。この式の右辺である $\frac{\partial G}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial G}{\partial \mathbf{x}}$ は実質微分と呼ばれる。他の微分記号と区別して一般に

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \quad (2-13)$$

と表される。三次元 $\mathbf{x}(x, y, z)$ 系では、速度ベクトルを $\mathbf{v}(u, v, w)$ とすれば、式(2-13)は

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (2-14)$$

と表すことができる。

2.2.2 コーシーの運動方程式

初めに、スラリーアイス運動方程式を求めるためにコーシーの運動方程式を導出する必要がある。面 ABCD に作用する表面力(隣接する流体が及ぼす力)の中で、x 方向のみを考えたと Fig.2-2 のようになる。

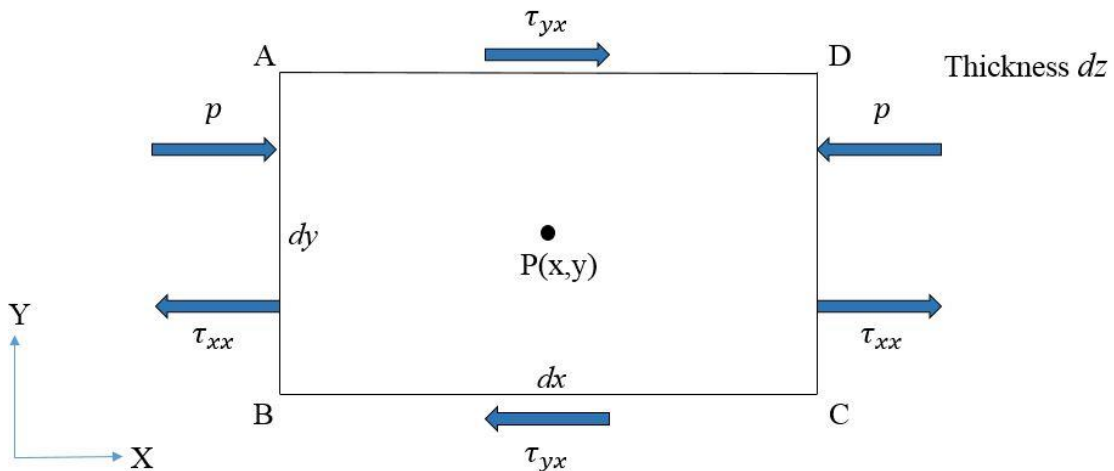


Fig.2-2 Surface force acting on the surface ABCD

実際は点PではなくAB、BC、CD、DA面に力がかかっている．ここから，テーラー展開を行うとFig.2-3のようになる．

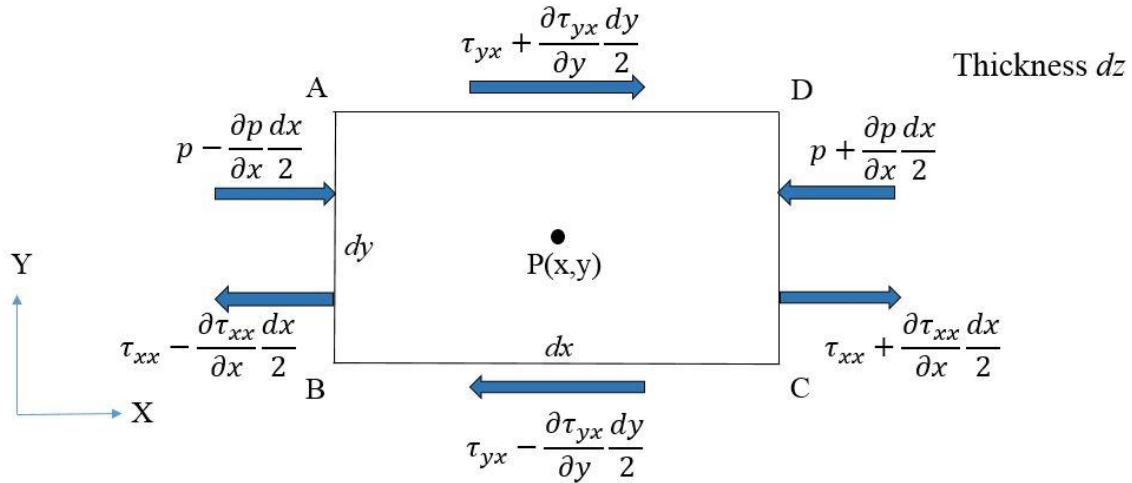


Fig.2-3 Surface force acting on the surface ABCD after the Taylor expansion

よって，表面力によるx方向の力 F_x^S は

$$F_x^S = \left\{ \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{dy}{2} - \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) \right\} dx dz + \left\{ \tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{dx}{2} - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \right\} dy dz + \left\{ p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \right\} dy dz$$

となり，これをまとめると

$$F_x^S = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) dx dy dz$$

となる．これを3次元で表すと

$$F_x^S = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz$$

という形になる．

次に，単位質量あたり $K(X,Y,Z)$ の外力(例えば重力など)が微小要素に働いているとすると，x方向の体積力 F_x^B は

$$F_x^B = \rho dx dy dz X$$

表面力と体積力の合力が慣性力と釣り合うことになる．慣性力は微小要素の質量×加速度であるので速度ベクトルを $\mathbf{v}(u, v, w)$ とするとx方向の運動方程式は

$$m \frac{Du}{Dt} = F_x^B + F_x^S$$

となる。すなわち、

$$\rho dx dy dz \frac{Du}{Dt} = \rho dx dy dz X + \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz$$

と表すことが出来る。両辺にある $dx dy dz$ を消去すると x 方向の運動方程式は

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}$$

となる。同様に y 方向, z 方向について表すと

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}$$

のようになる。これをベクトル表記すると

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{K} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

となり、この式をコーシーの運動方程式と呼ぶ。 $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$ がなければ非粘性流体の運動を表すオイラーの式となる。 \mathbf{K} はもし重力のみだとすると $X = Y = 0$, $Z = -g$ となる。また、三次元 x 方向, y 方向, z 方向の場合のコーシーの運動方程式を表すと

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

となる。

2.2.3 構成方程式について

力学的変数（応力テンソルおよびその時間微分）と運動学的変数（ひずみテンソルおよびひずみ速度テンソル等）を関係づける式を構成方程式という。いわゆる、応力とひずみおよびひずみ速度との関係式である。構成方程式は物質の種類によって変わる。代表的なもの例としてニュートン流体（線形流体）というものがある。流体の粘性は単純に

Fig.2-4 のように h の間隔をもった二枚の平行な下は固定面, 上は速度 U で固定面に対して平行に移動するとして, 上面を動かすのに逆らう力を考える。

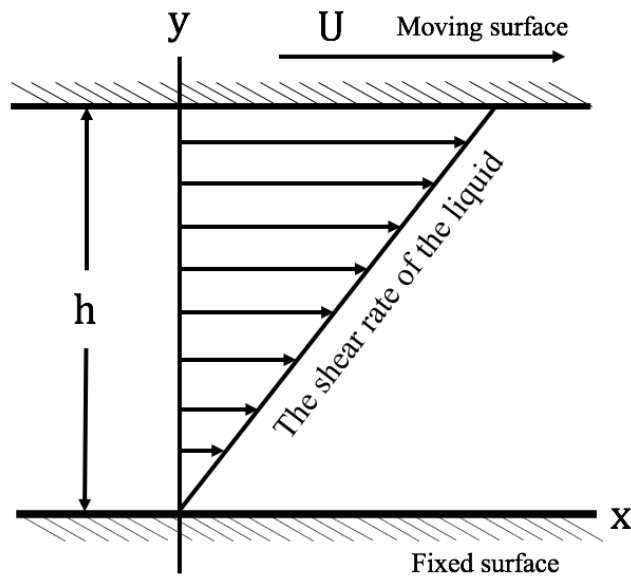


Fig.2-4 Evaluation principle of flow characteristics

下の固定面では流体がそのままの位置を保持しようとするため速度は 0 で，上の移動面にある流体は速度 U で動こうとする．上面と下面の間では下面からの距離 y に比例する速度で運動をすることになる．これを式で表すと

$$u = U \frac{y}{h}$$

となる．上面を動かすのに逆らう力と下面を固定するのに必要な力は等しく，いずれも速度 U に比例し，距離 h に反比例する．流体の接触している単位面積についての力 τ_0 は次のようになる．

$$\tau_0 = \mu \frac{U}{h}$$

表面に平行な力の単位面積あたりの作用をせん断応力とすれば上面と下面の隙間にある流体のすべての部分に τ_0 とおなじ一つのせん断応力 τ が作用していることになる．よって τ は

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

つまり，せん断応力がせん断速度に比例することを示し，ニュートンによって設定された関係であり，Fig.2-5 のようなせん断応力とせん断速度の関係となり，ニュートン流体と呼ばれる⁵⁾．

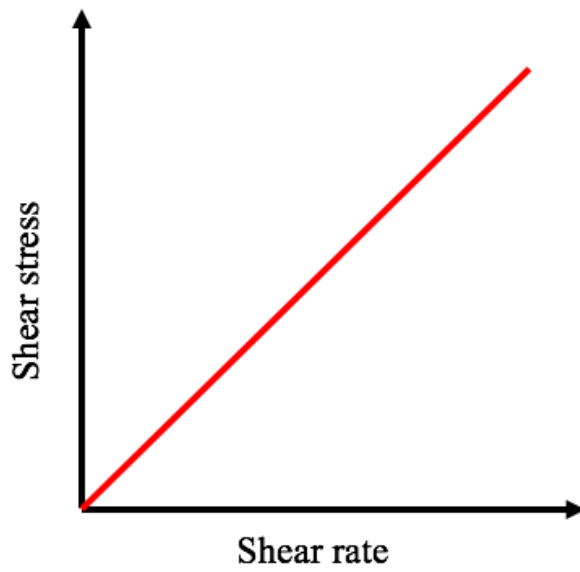


Fig.2-5 Newtonian fluid

この比例関係は気体や低分子の液体（空気，水など）では正しく成り立つが，複雑な成分の液体（コロイド溶液，高分子流体など）では成り立たず，そのような流体は非ニュートン流体と呼ばれる．非ニュートン流体には Fig.2-6 から Fig.2-8 のように様々な特徴を持った流体がある．

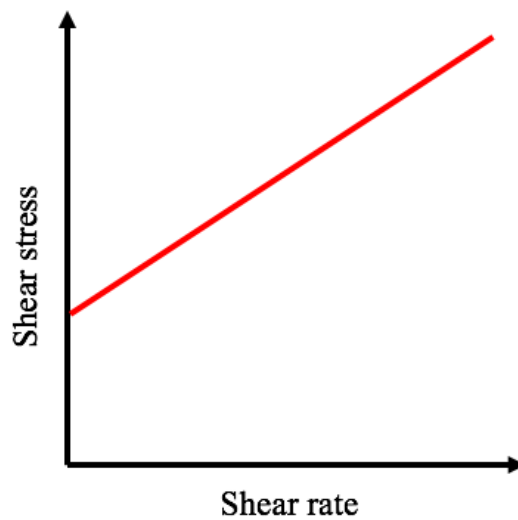


Fig.2-6 Bingham fluid

ある程度の力を加えなければ流動をすることがなく、この流動をさせるために必要な降伏応力を持つ。この中でも、一度、流動しだすとニュートン流体のように一定の粘度となる挙動を示すものをビンガム流体（塑性流体）という。

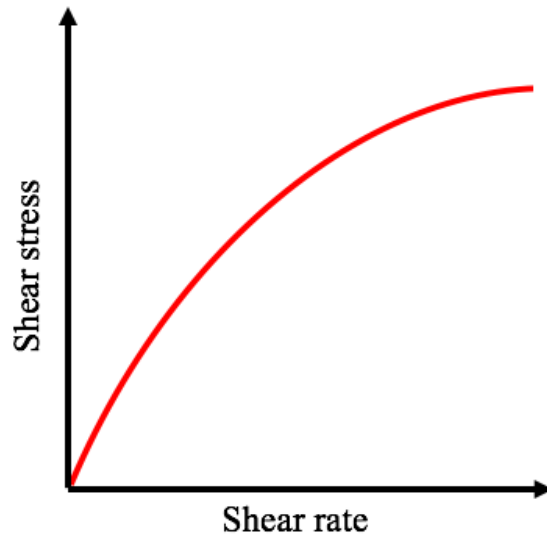


Fig.2-7 Pseudoplastic fluid

力を加えることにより粘度が低下するものを擬塑性流体という。力を加えるまでは高い粘度を示すため、あたかもビンガム流体（塑性流体）のような振る舞いをする。

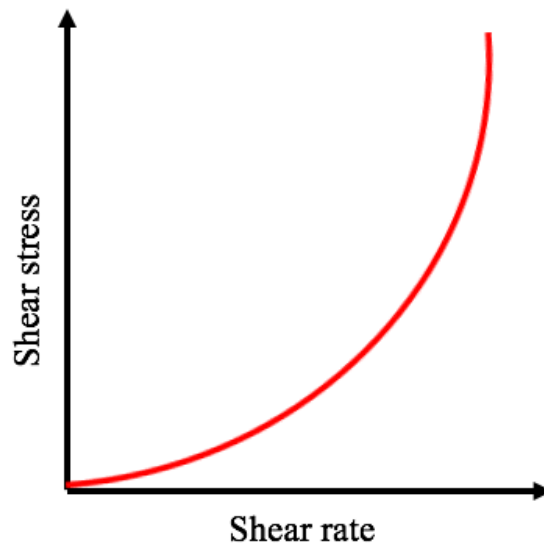


Fig.2-8 Dilatant fluid

擬塑性流体とは逆に、力を加えることにより、粘度が上昇する流体のことを言う。現象としては、緩やかに傾けると静かに水の様に流れるが、棒でかき混ぜたり、流体に対して応力を加えると、固化したように締め固まり流れにくくなる。このような流体をダイラタント流体という。

流体の運動方程式を導出するには2.2.2にて導出をしたコーシーの運動方程式に構成方程式を代入することによって運動方程式を求めることが出来る。一例として、ニュートン流体を対象とすると、コーシーの運動方程式にニュートン流体の構成方程式を代入すると、

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho K - \nabla p + \mu \nabla^2 v$$

となる。これによってナビエ・ストークス方程式が導出され、ニュートン流体の運動方程式を導出することが出来る。ナビエ・ストークス方程式をナビエ・ストークス方程式を三次元 x 方向, y 方向, z 方向の場合で書き下すと

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

と表される。

しかし、スラリーアイスにはニュートン流体ではなく、非ニュートン流体であるため、ニュートン流体の構成方程式を用いることが出来ない。そのため、スラリーアイスがどのような流動の挙動を示すのかを確かめ、スラリーアイスに関する構成方程式を求める必要がある。

第3章 実験装置について

3.1 粘度測定法について

3.1.1 細管式

細管式による粘度測定を行う場合 Fig.3-1 のように円管細管内に流体が層流として流れるとき、長さ L 、直径 $2R$ の円管細管内に流れる流体の流量 Q とし、細管の両端の圧力を P_1 と P_2 、圧力差 $P_1 - P_2$ を ΔP とすると式のように表される。

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta L} \quad (3-1)$$

式(3-1)より粘度は式(3-2)のように表される。

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8L Q} \quad (3-2)$$

したがって、Fig.3-1 で構成されるような細管式粘度計においては、細管を流れる流体の流量と細管両端の圧力差を測定することにより、粘度を求めることが出来る。

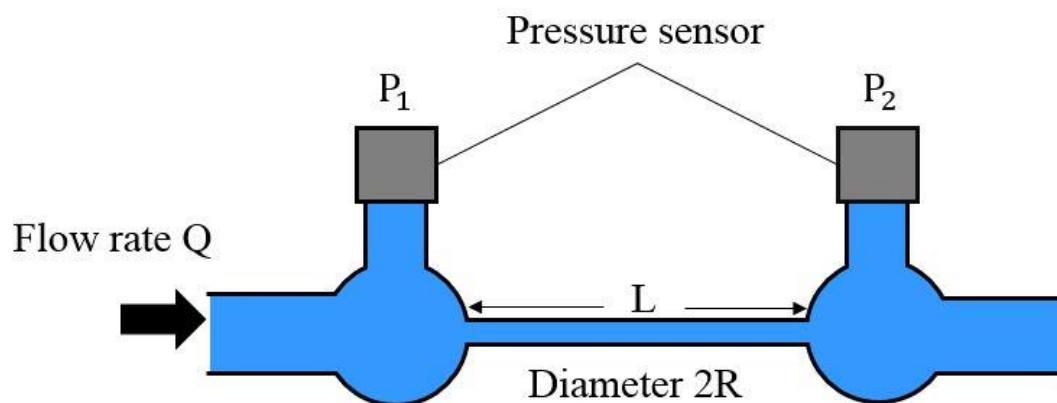


Fig.3-1 Principle of capillary viscometer

3.1.2 回転式

円筒形の回転子を試料の中に入れ、モーターによって一定の速度で回転させる。その際に、回転運動を定常的に起こすのに必要なトルクが粘度に比例することを利用した方法が回転式の粘度測定方法である。回転式の中でも様々な方法があり、一番簡単な方式である単一円筒形回転粘度計や同一の中心軸を持つ外筒と内筒の隙間に試料を満たし、層流状態で回転流動させ、粘度を測定する共軸二重円筒形粘度計などがある。

3.1.3 音叉振動式粘度計について

本実験を行う上で粘度計は音叉振動式粘度計(エアンドアイ製, RV-10000A)を使用した。Fig.3-2 に音叉振動式粘度計の外観を示す。



Fig.3-2 Appearance of tuning fork vibration type viscometer

振動式のため外部から振動が与えられると、計測結果に誤差が出てしまうため、除振台の上に計測部全体を載せている。支柱にセンサユニットが取り付けられており、センサユニットの一番下に粘度検出部がある。試料の位置を調節するためのテーブルもあり、前後、左右、高さ方向の位置を調節することが出来る。粘度測定部には振動子と温度センサーが装備されており、振動子の材質はチタン製となっている。

同じ固有振動数を有する二つの振動子を配置し、振動子を個別に同期させ、電磁力で駆動する。この時の二つの振動子は逆位相で動き、音叉同様外部への反力が発生しない。粘度測定時には連続して発生する振幅を計測制御することで、振幅一定の条件を出し、この際、振動子の駆動に必要な電磁力を測定する。駆動力が振動子を浸けた液体の粘度×密度に比例することを利用し、粘度を測定する。振動式は他の粘度測定方法に比べ、試料液体へ微小な変位しか与えないため、試料に加わるエネルギーが小さく、また、振動子の熱容量が小さいため、測定による試料物性への干渉を最小限にとどめることができる。よって、液体粘度値の温度変化は $-2 \sim -10\%/^{\circ}\text{C}$ と大きいと、測定系の干渉が小さいことは、試料の温度変化による物性変化を起し難いなどの利点がある⁶⁾。音叉振動式粘度計の測定部の機構をFig.3-3 に示す。

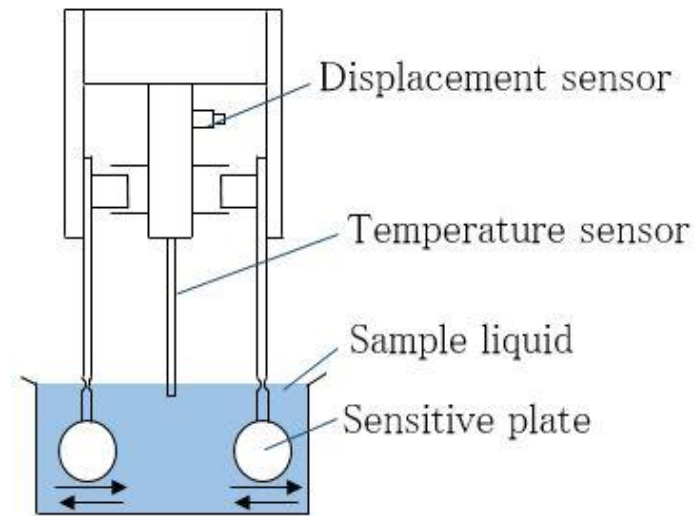


Fig.3-3 Mechanism of viscosity detector

Fig.3-3 に示した自由振動系のモデルでは，測定系の質量による慣性項，液体の粘度による粘性項と測定系のバネ定数によるバネ項が考えられる．運動方程式で表すと式(3-3)のようになる

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx = F \sin \omega t \quad (3-3)$$

F : 加振力 m : 質量

c : 粘性係数 K : バネ定数

この測定系のバネ定数と質量により決定される固有振動数にて，測定系を電磁力にて強制駆動すると，慣性力とバネの復元力が釣りあい，測定系で消費されるエネルギーは，液体の粘性項のみとなる．よって

$$c \frac{dx}{dt} = F \sin \omega t \quad (3-4)$$

となる．ここで特解を

$$x = X \sin(\omega t - \phi) \quad (3-5)$$

とおく．これを式(3-4)に代入すると，

$$c\omega X \cos(\omega t - \phi) = F \sin \omega t \quad (3-6)$$

この式(3-6)に対し，加法定理より

$$c\omega X(\cos \omega t \cdot \cos \phi + \sin \omega t \cdot \sin \phi) = F \sin \omega t \quad (3-7)$$

となり、式(3-7)を $\sin \omega t$ と $\cos \omega t$ について整理すると

$$(c\omega X \sin \phi - F) \sin \omega t + c\omega X \cos \phi \cdot \cos \omega t = 0 \quad (3-8)$$

となる。この式が任意の時刻 t について成り立つためには、 $\sin \omega t$ と $\cos \omega t$ の係数が 0 になればよい。このことから、

$$\begin{aligned} c\omega X \sin \phi - F &= 0 \\ c\omega X \cos \phi &= 0 \end{aligned} \quad (3-9)$$

が得られる。よって振幅 X は

$$X = \frac{F}{c\omega} \quad (3-10)$$

となる。 ω は振動系の固有振動数であり、固有振動数を一定値とすると、加振力： F と粘性係数： c には比例関係にある。音叉振動式粘度計では、上記原理を利用し、電磁力により2枚の振動子を固有振動数で共振させ、高感度での粘度測定を可能としている⁷⁾。

また、音叉振動式粘度計(エーアンドアイ製、RV-10000A)は振動させるのに必要となる力を検出することで、液体の“粘度×密度”測定している。液体から振動子が受ける機械的インピーダンス R_z は

$$R_z = A\sqrt{\pi f \eta \rho} \quad (3-11)$$

f ：振動周波数 A ：振動子の両面面積

η ：液体の粘度 ρ ：液体の密度

となる。電磁駆動部が振動片に一定の振動速度 $V e^{i\omega t}$ を与えている力を F とすると、機械的インピーダンス R_z は

$$R_z = \frac{F}{V e^{i\omega t}} = A\sqrt{\pi f \eta \rho} \quad (3-11)$$

となる。よって、電磁駆動部が与えている力は、液体の粘度 η と密度 ρ の積に比例していることから、測定の値から液体の密度を除することによって液体の粘度の値を求めることが出来る⁷⁾。今回の実験では試料の対象をスラリーアイスとするために試料への影響が少ない音叉振動式の粘度計を用いた。

測定した値は粘度 η と密度 ρ の積になることから、試料の密度を求める必要がある。スラリーアイスの場合水溶液と氷粒子が懸濁し、スラリーアイス内に氷粒子が一様に分散している状態とした場合のスラリーアイスの密度は、

$$\rho_{Si} = \frac{IPF_v}{100} \rho_I + \frac{(1 - IPF_v)}{100} \rho_{NaCl} \quad (3-12)$$

ρ_{Si} : スラリーアイスの密度 IPF_v : 体積 IPF

ρ_I : 氷の密度 ρ_{NaCl} : NaCl 水溶液の密度

となる。しかし、サンプリング方式により塩分濃度が求まり、その結果から導出している IPF はスラリーアイスの全重量に対する氷粒子の重量の割合で定義される重量 IPF の値となる。そのため、スラリーアイスの密度を求めるために重量 IPF をスラリーアイスの全体積に対する氷粒子の体積も割合で定義される体積 IPF に変換する必要がある。体積 IPF と重量 IPF の関係を表す式は

$$IPF_v = \frac{\frac{IPF_{wt}}{\rho_I}}{\frac{(1 - IPF_{wt})}{\rho_{NaCl}} + \frac{IPF_{wt}}{\rho_I}} \quad (3-13)$$

IPF_v : 体積 IPF IPF_{wt} : 重量 IPF

ρ_I : 氷の密度 ρ_{NaCl} : NaCl 水溶液の密度

となる。 ρ_I に氷の密度 917[kg/m³], ρ_{NaCl} に塩分濃度 1wt%の NaCl 水溶液の密度 1010[kg/m³] を代入した場合の IPF_{wt} と IPF_v の関係を Fig.3-4 に示す。固相と液相の密度差が小さいため、二つの IPF の値に大きな差はない。

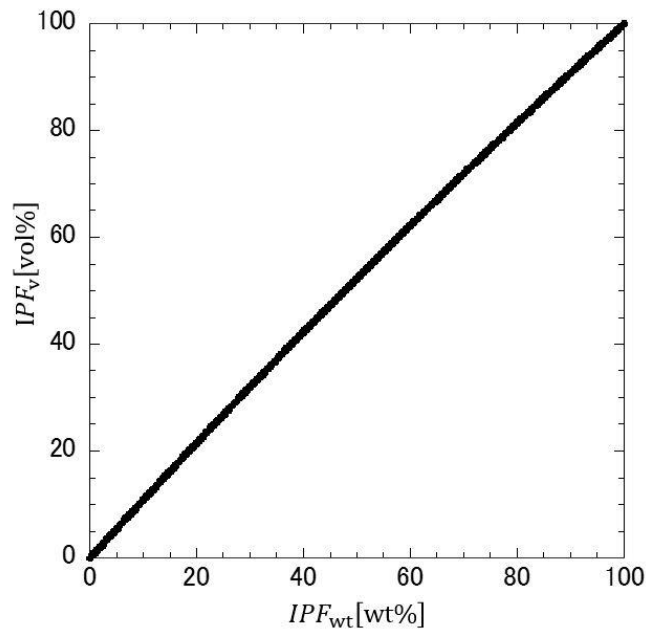


Fig. 3-4 Relationship between IPF_{wt} and IPF_v

第4章 実験方法と近似

4.1 ポリアミド粒子を使った粘度測定実験

流動特性の検討を行うために雰囲気でも定常な状態となるポリアミド粒子(DANTEC DYNAMICS, PSP-50)を使い、粘度測定を行った。本来はスラリーアイスを用いて粘度測定実験を行うことが最良だが、スラリーアスをサンプルとして $IPF=25\%$ で得ることが困難であり、正確な粘度測定実験を行うことが出来ないため、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ることによって試料の中での粒子が一様になり、擬似的なスラリーアイスとして用いることが出来るのではないかと考え、実験を行った。ポリアミド粒子の特性を Table 4-1 に示す。

Table 4-1 Properties of polyamide particle

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

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 5,10,15,20,25%とし、温度を 20°C 一定に保ち実験を行った。振幅を 0.1mm から測定し、1.2mm まで 0.01mm 刻みで変化させた。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。

4.2 攪拌を用いた粘度測定実験

本研究ではスラリーアスの粘度測定を行うことを目指しているが、現在の測定システムではサンプルとして採取したスラリーアスの IPF が把握できないことや氷が浮上してしまい氷粒子の分布が一様にならない。このことから、スラリーアスの正確な粘度測定が難しいため、温度を一定に保ち攪拌を行いながら粘度測定することで正確な粘度が得られるのではないかと考えた。本実験では攪拌を行いながら粘度測定することでどのような流動特性を有するのかを検討する実験を行った。実験方法は試料の中に 50mm の回転子を入れ、スターラー(CORNING PC-420)で回転させ、試料を攪拌する。スターラーの外観を図に示す。試料にはポリアミド粒子(DANTEC DYNAMICS, PSP-50)を用い、音叉振動式粘度計(エアンドアイ製, RV-10000A)を用いて粘度測定を行った。ポリアミド粒子の充填率を 25%とし、振幅を 0.1mm から 1.2mm まで 0.01mm 刻みで増加させ、1.2mm から折り返し 0.1mm まで 0.01mm 刻みで減少していく条件にて実験を行った。

4.3 スラリーアイスを使った粘度測定実験

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、試料内で一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(エアアンドアイ製、RV-10000A)を使用した。スラリーアイスを採取する際にタンク内の塩分濃度を塩分濃度計(ATAGO PAL-SOLT Mohr)を用いて測定し、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、採取したときの NaCl 水溶液の塩分濃度を測定し、粘度測定実験を行った後に、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スを攪拌し、容器内で氷粒子がなるべく一様になるようにした。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、Fig.4-1、Fig.4-2 に示すような装置を製作した。

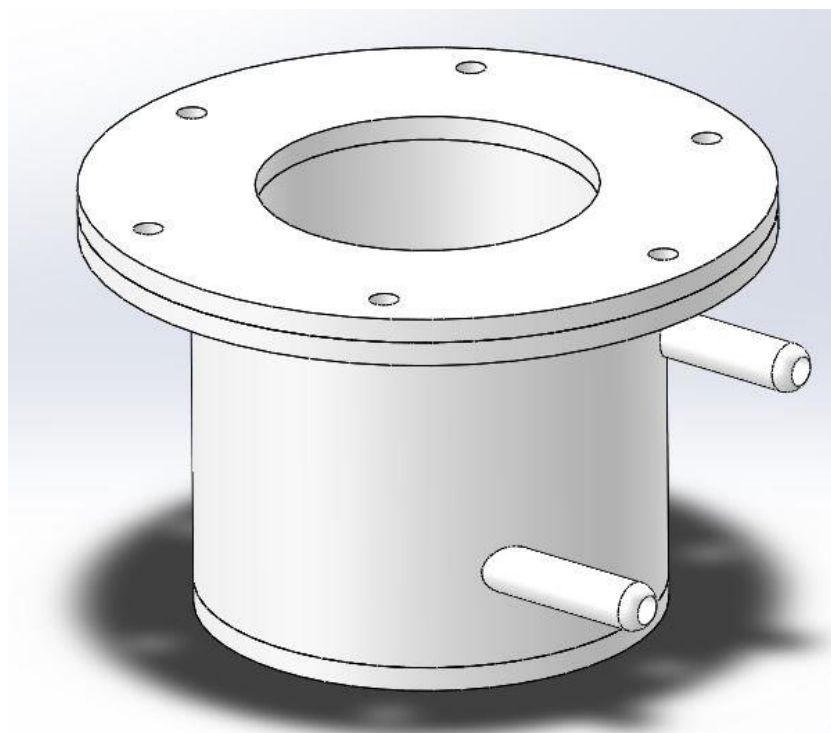


Fig. 4-1 Appearance of apparatuses

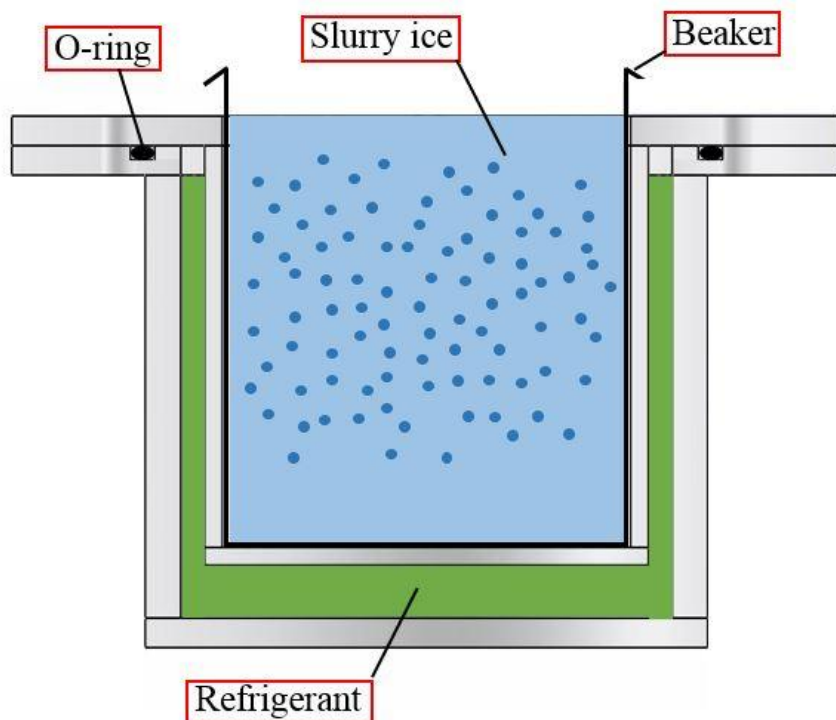


Fig. 4-2 Internal structure of apparatuses viewing from a side face

内筒と外筒の上部に O リングを入れ冷媒の漏れを防ぎ、ボルトによって固定し、内筒と外筒の間に冷媒が流れるような構造となっている。外部密閉系冷却水循環装置(CF301 ヤマト科学製)を用いて Fig. 4-3 に示すように内筒と外筒の間に冷媒を循環させ、スラリーアイスの温度を一定に保った。ホースや装置の中に冷媒を循環させる際に、結露がしないように断熱材を巻き、実験を行っている。本実験では粘度測定実験によって氷粒子が融解してしまうことを考慮し、実験時間を短くするために振幅を 0.1mm から 1.2mm まで 0.1mm 刻みで変化させ、1.2mm から折り返し 0.1mm まで 0.1mm 刻みで減少していく条件にて実験を行った。

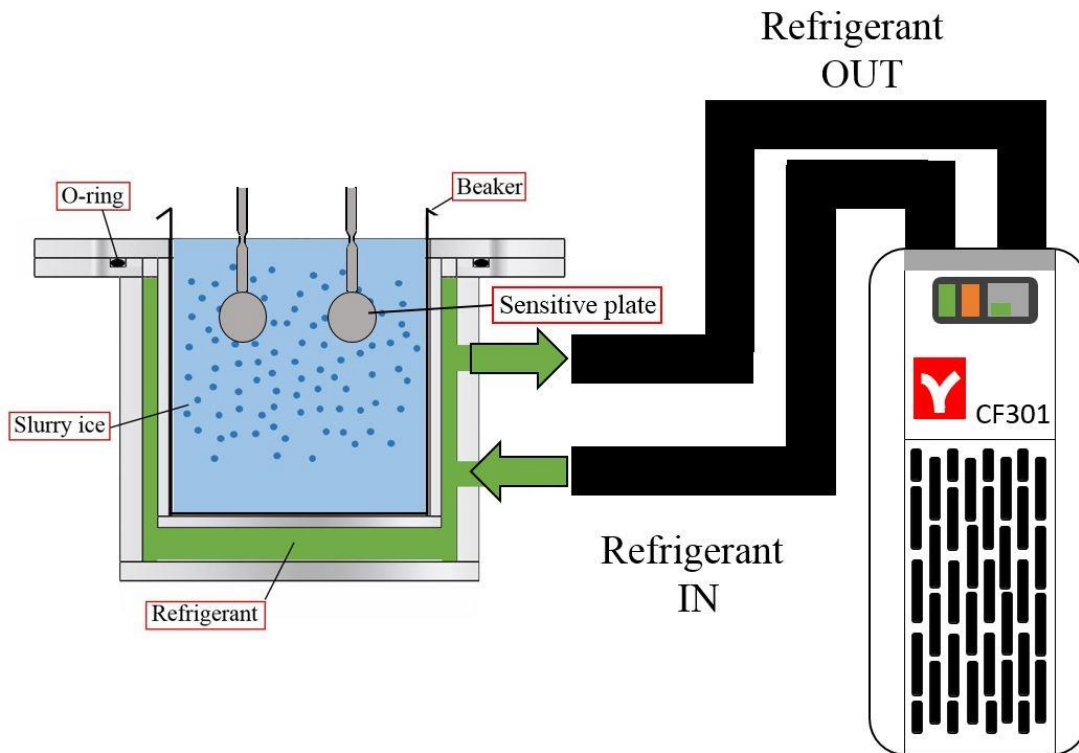


Fig. 4-3 Flow diagram of experimentation

4.4 Casson 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に用いる際は、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の粘性項 $\nabla \cdot \tau$ の部分に代入する構成方程式を求めするために、粘度やせん断速度を求め、応力偏差テンソル τ を求める必要がある。応力偏差テンソル τ 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(4-1)を用いて近似を行った。

$$\sqrt{\tau} = a\sqrt{\dot{\gamma}} + b, \quad \sqrt{\mu} = a + \frac{b}{\sqrt{\dot{\gamma}}} \quad (4-1)$$

τ : せん断応力, $\dot{\gamma}$: せん断速度, μ : 粘度

$\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ のとき $\sqrt{\mu} \rightarrow a$ となるので、 a^2 と呼ばれ、 b^2 は降伏値を表している。ニュートン流動では $a = \sqrt{\mu}$, $b = 0$ となる。 a と b の値は $\sqrt{\tau}$ を $\sqrt{\dot{\gamma}}$ に対してプロット(キャッソンプロット)⁸⁾ をすることにより求めることができる。したがって、流動曲線の数式を得ることができ、シミュレーション解析を行う際に用いることができる。

4.5 Herschel-Bulkley 式による近似

Herschel-Bulkley 式は Casson 式と同様に非ニュートン流体の一般化されたモデルであり、Herschel-Bulkley 式は、

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (4-2)$$

τ : せん断応力 τ_0 : 降伏応力

$\dot{\gamma}$: せん断速度 n : フローインデックス

で表される。 $\tau < \tau_0$ である場合、流体は固体として挙動し、 $\tau > \tau_0$ である場合は液体として挙動する。 $n = 1$ の場合はビンガム流体の挙動となり $n = 1$ 、 $\tau_0 = 0$ の場合にはニュートン流動となる。降伏応力を自ら設定し、せん断応力から降伏応力を引いた値を $\dot{\gamma}$ に対しプロットし、累乗近似を行うことによって数式を求めた。Casson 式と Herschel-Bulkley 式を用いて数式の算出を行った。

第5章 実験結果

5.1 ポリアミド粒子を使った粘度測定実験

ポリアミド粒子の充填率 5,10,15,20,25%の実験結果を Fig. 5-1 に示す.

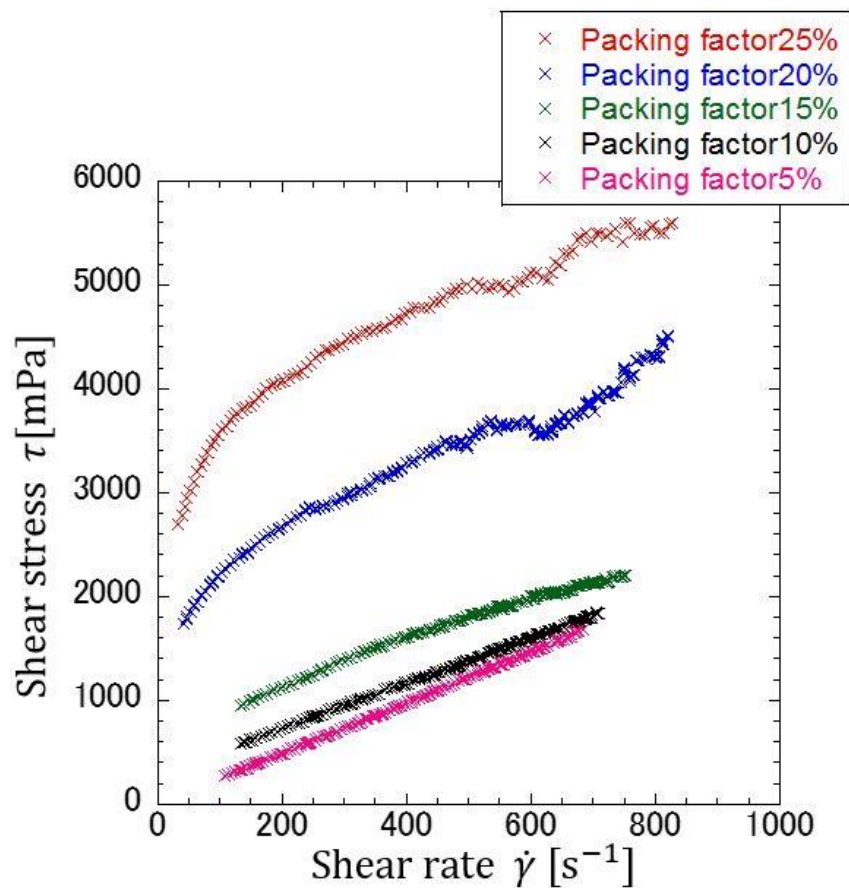


Fig. 5-1 Flow curve at each packing factor of polyamide particle

ポリアミド粒子の充填率が 5%,10%,15%のときはビンガム流体のような流動曲線を示したが、充填率が 20%,25%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。ポリアミド粒子の充填率 25%の結果を抜き出したものを Fig. 5-2 に示す。

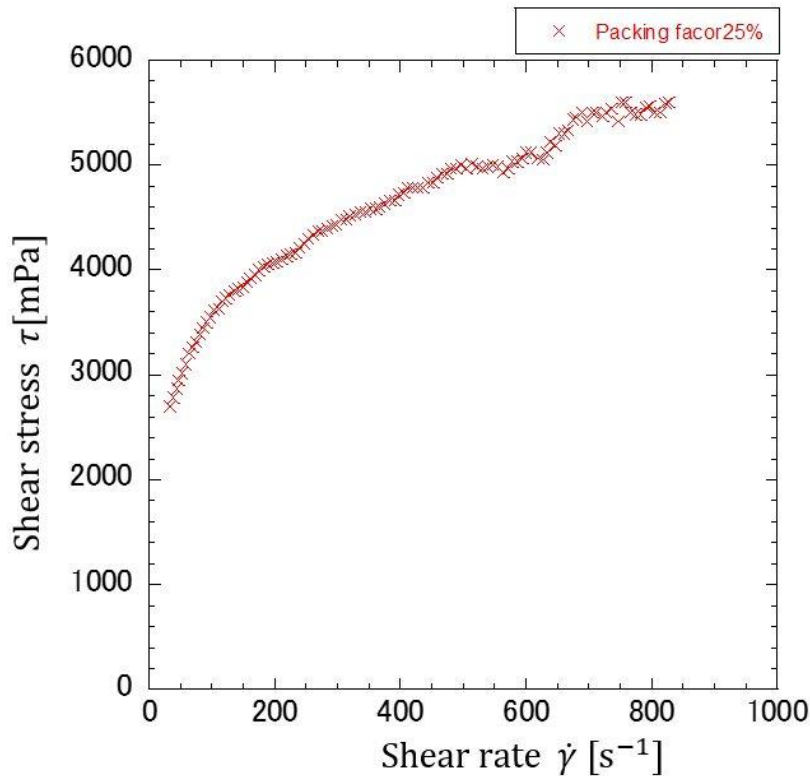


Fig. 5-2 Flow curve at packing factor 25% of polyamide particle

粘度測定実験より得られた結果から近似を行い、流動曲線の数式を得る。Casson 式 $\sqrt{\tau} = a\sqrt{\dot{\gamma}} + b$ を用いる場合、実験結果の値から係数である a と b の値を読み取ることは出来ないため a と b の値を求める必要がある。 a と b の値を求めるために、実験結果のデータからキャッソンプロットを用いることによって a と b の値を求める。縦軸にせん断応力 [mPa] でプロットしていたものをせん断応力の $\frac{1}{2}$ 乗 [mPa^{0.5}] でプロットし、同様に、横軸にせん断速度 [s⁻¹] でプロットしていたものをせん断速度の $\frac{1}{2}$ 乗 [s^{-0.5}] でプロットする。縦軸、せん断応力の $\frac{1}{2}$ 乗 [mPa^{0.5}]、横軸、せん断速度の $\frac{1}{2}$ 乗 [s^{-0.5}] でポリアミド粒子の充填率 25% の実験結果を再プロットし、その結果に対して、近似線を引いた。ポリアミド粒子の充填率 25% の流動特性の実験結果をキャッソンプロットしたものを Fig. 5-3 に示す。

近似線の結果から傾きと切片より、 a と b の値を求めることが出来る。よって、

$$a = 0.8686, \quad b = 50.743$$

のような結果となった。このことから、ポリアミド粒子の充填率 25% の実験結果から

$$\sqrt{\tau} = 0.8686\sqrt{\dot{\gamma}} + 50.743$$

という数式を求めることが出来る。求めた数式 $\sqrt{\tau} = 0.8686\sqrt{\dot{\gamma}} + 50.743$ とポリアミド粒子の充填率 25% の実験結果に関して、縦軸にせん断応力 [mPa]、横軸にせん断速度 [s⁻¹] でプロットしたものを Fig. 5-4 に示す。

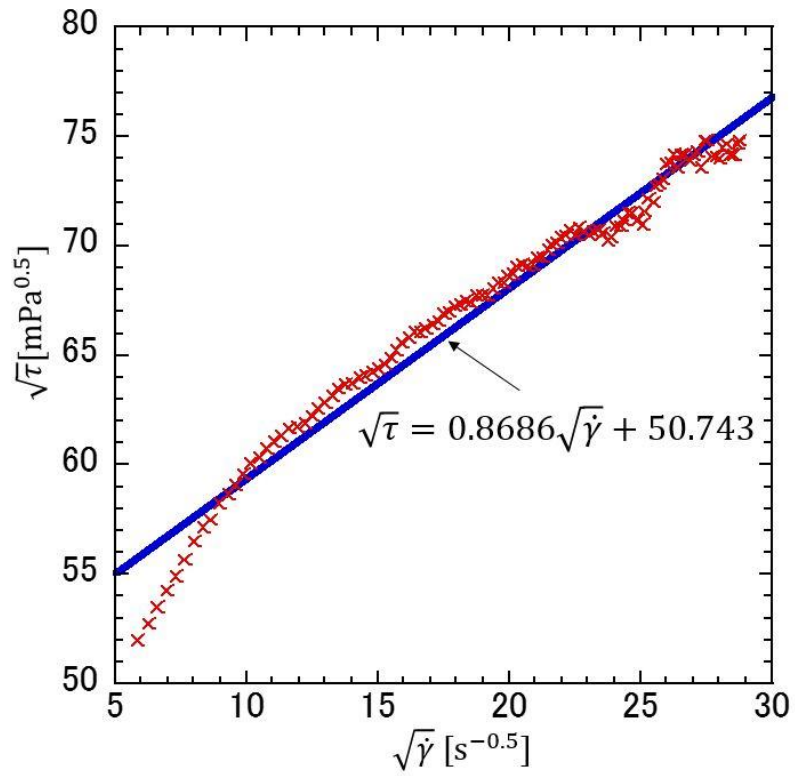


Fig. 5-3 Casson plot with packing factor 25% of polyamide particle

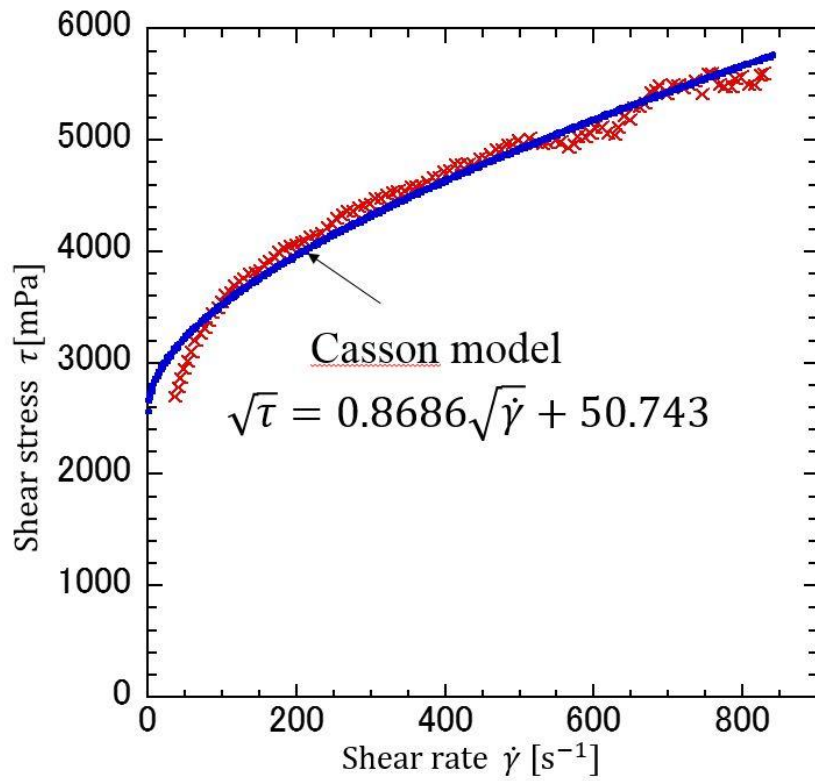


Fig. 5-4 Casson model and flow curve at packing factor 25% of polyamide particle

キャッソン式 $\sqrt{\tau} = a\sqrt{\dot{\gamma}} + b$ の場合、 b^2 は降伏応力を表しており、ポリアミド粒子の充填率25%での b の値は $b = 50.743$ であることから、降伏応力は、

$$50.743^2 = 2574.852$$

となる。実験結果と比較的相関のある数式となっているが、せん断速度が小さい領域では、実験結果と数式の誤差が大きくなっている。また、現在ダイレクト型スラリーアイス生成装置においてスラリーアイスを生成する際には、掻き取り刃の回転数は $360\text{rpm}=6\text{s}^{-1}$ と設定している。このことから、せん断速度が小さい領域での相関が必要と考え、せん断速度 200s^{-1} 以下の範囲で再びキャッソンプロットを行った。 200s^{-1} 以下の範囲で行ったキャッソンプロットの結果を Fig. 5-5 に示す。キャッソンプロットにより

$$a = 1.3867, \quad b = 45.132$$

が求まり、流動曲線は、

$$\sqrt{\tau} = 1.3867\sqrt{\dot{\gamma}} + 45.132$$

という数式が得られた。得られた数式 $\sqrt{\tau} = 1.3867\sqrt{\dot{\gamma}} + 45.132$ とポリアミド粒子の充填率25%の実験結果に関して、縦軸にせん断応力[mPa]、横軸にせん断速度 $[\text{s}^{-1}]$ でプロットしたものを Fig. 4-6 に示す。

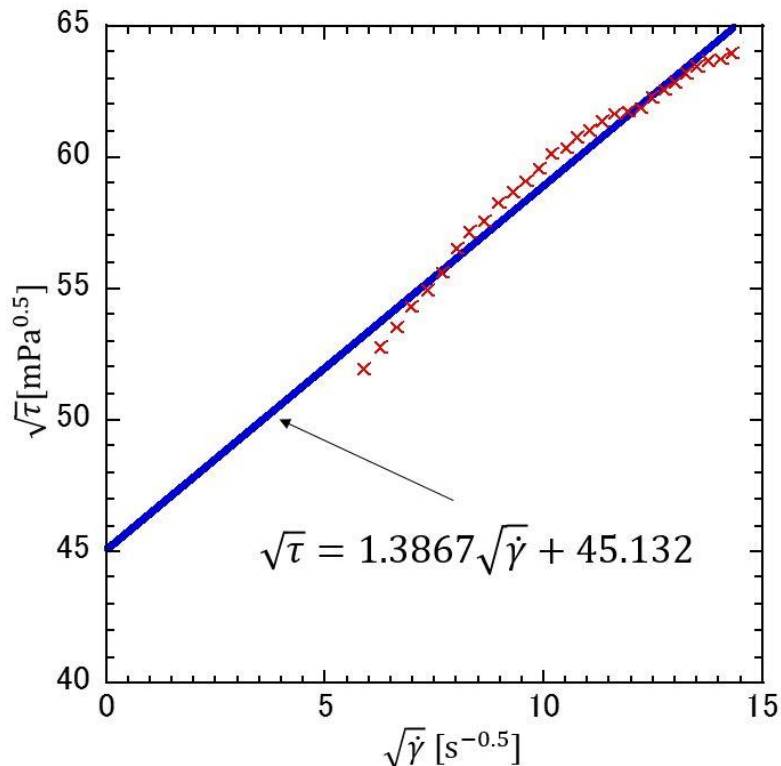


Fig. 5-5 Casson plot with packing factor 25% of polyamide particle with 200s^{-1} or less

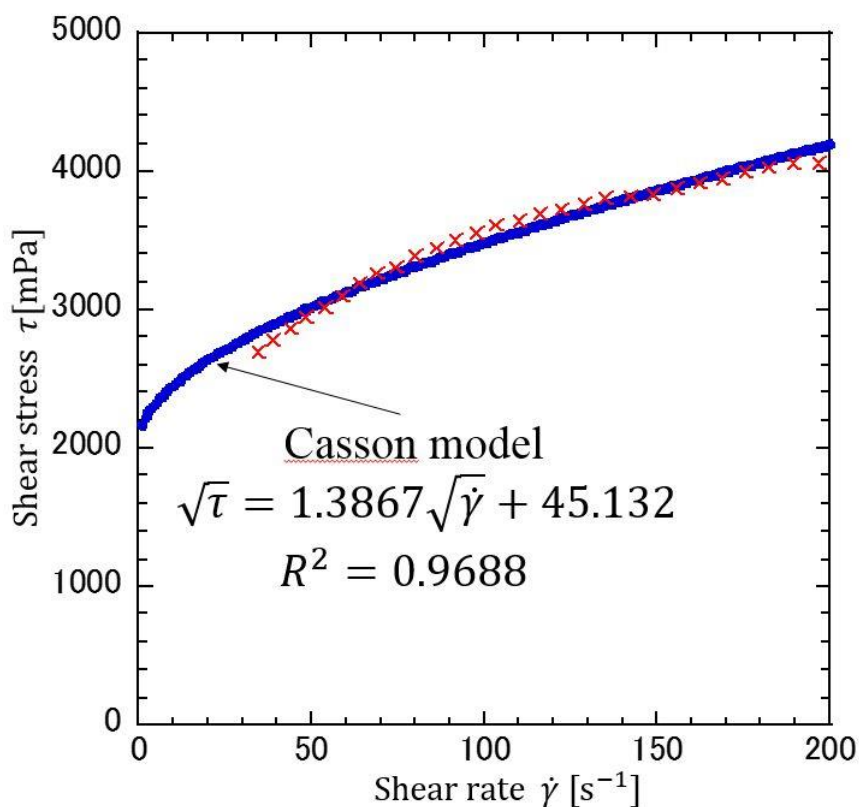


Fig. 5-6 Casson model with $200s^{-1}$ or less

せん断速度が $200s^{-1}$ 以下の範囲においては実験結果と数式において誤差が少なくなる結果となった。しかし、 $200s^{-1}$ 以下の範囲において近似を行ったので、せん断速度が大きくなるにつれ、実験結果と導出した数式に大きな誤差が生じてしまう。このことから、Casson 式は降伏応力を過大評価してしまうと考え、Herschel-Bulkley 式を用い、近似を行った。

Herschel-Bulkley 式を用いる際、実験結果からは降伏応力を読み取ることが出来ないため、降伏応力を仮に代入し、縦軸にせん断応力から降伏応力を引いた値、横軸にせん断速度をプロットし累乗近似を行った。降伏応力を 100mPa から 500 mPa まで 100 mPa 刻みで代入し、累乗近似を行った結果を Fig. 5-7 から Fig. 5-11 に示す。

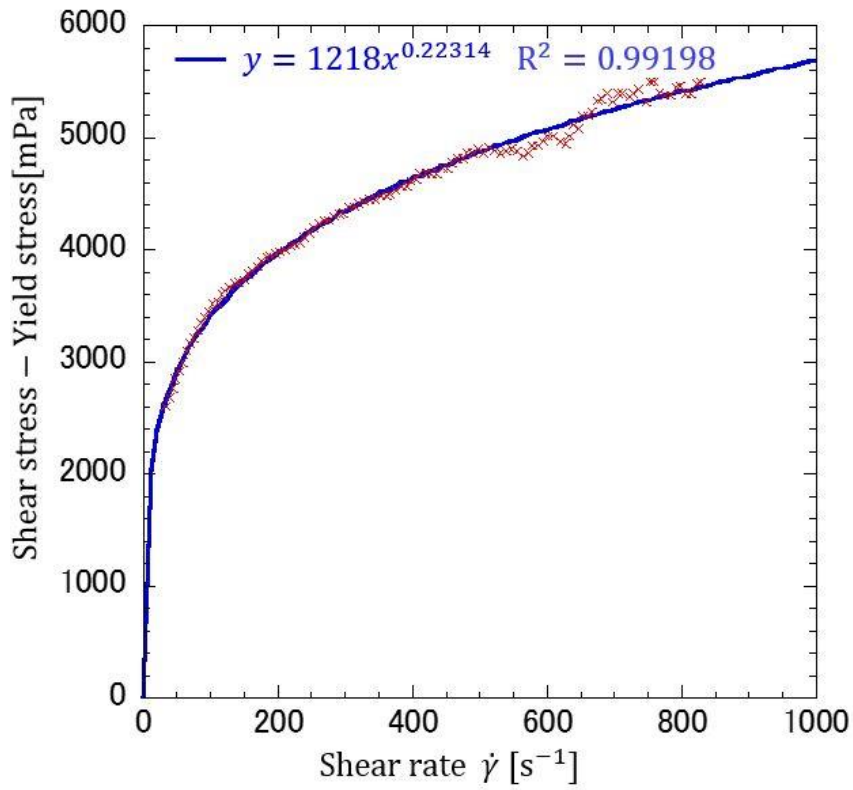


Fig. 5-7 Yield stress 100[mPa]

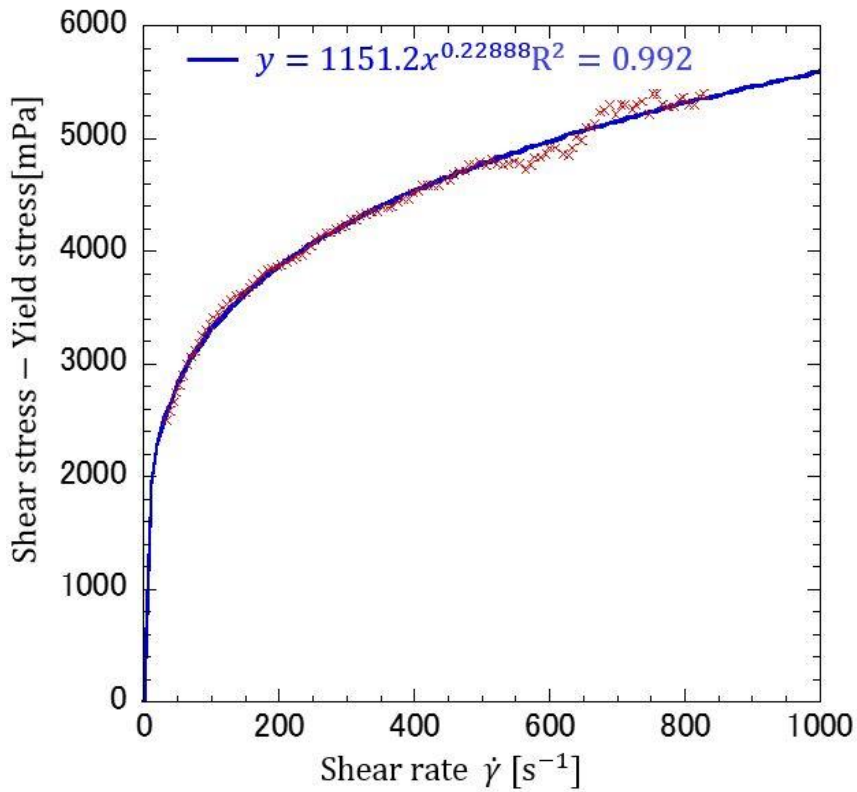


Fig. 5-8 Yield stress 200[mPa]

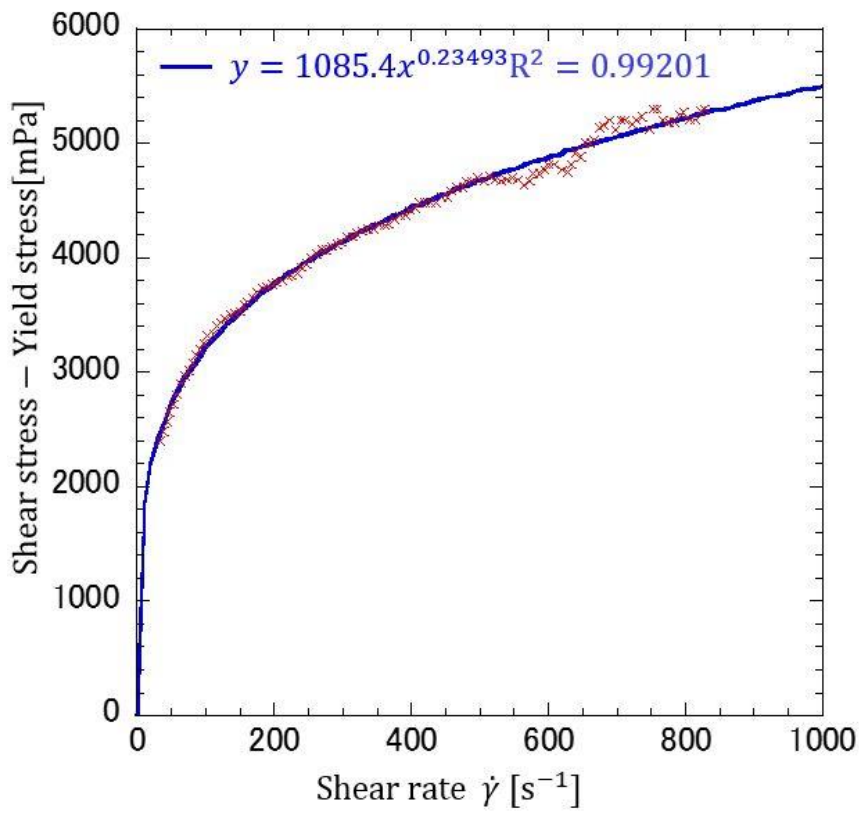


Fig. 5-9 Yield stress 300[mPa]

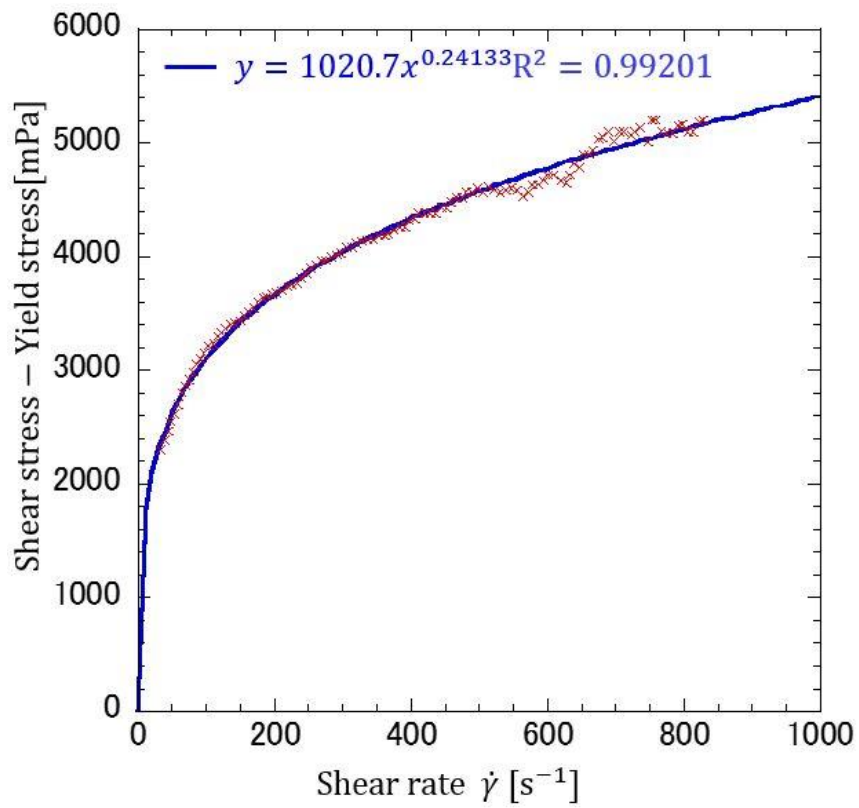


Fig. 5-10 Yield stress 400[mPa]

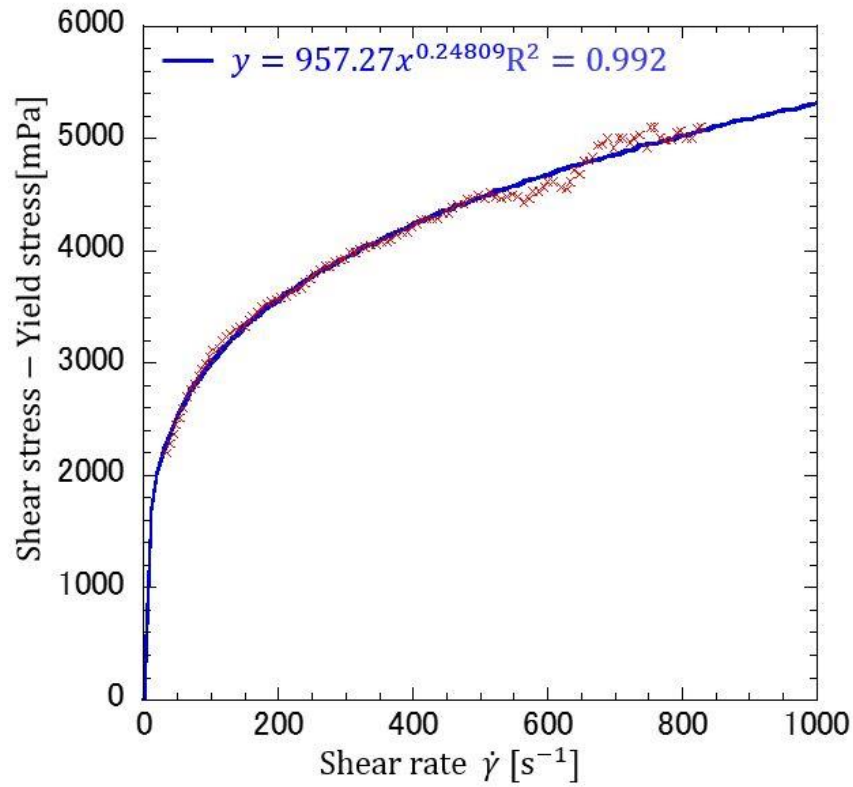


Fig. 5-11 Yield stress 500[mPa]

降伏応力を 100 mPa から 500 mPa まで 100mPa 刻みで代入した結果，降伏応力を 300mPa とした際に一番相関が見られた．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，プロットすると Fig. 5-12 のようになる．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．

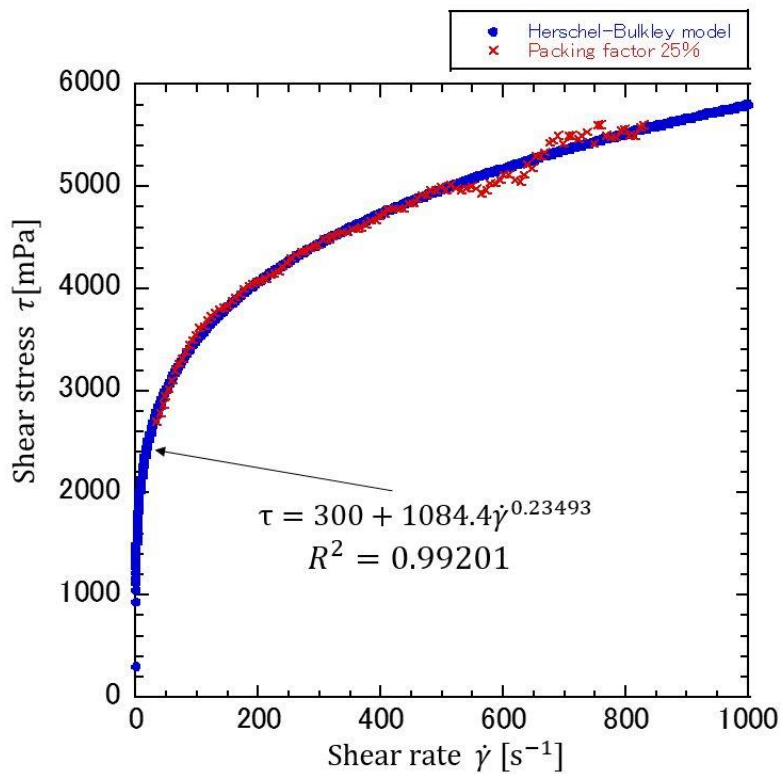


Fig. 5-12 Herschel-Bulkley model

5.2 攪拌を用いた粘度測定実験

粒子の充填率 25% のポリアミド粒子を攪拌させながら粘度測定実験を行った場合の実験結果を Fig. 5-13 に示す。流動曲線は降伏点を持つ擬塑性流体のような流動曲線を示し、攪拌を用いることで、試料の中で粒子が一樣となり、攪拌を行っていない場合に比べて流動曲線に乱れがないグラフを示している。しかし、ニュートン流体である蒸留水で同様な粘度測定をおこなうと、攪拌の影響によって回転数の上昇に伴い、粘度の測定値が上昇する結果となった。このことから、攪拌を行うことによって、振動子付近の流れに対しての抵抗が粘度として表れているのではないかと考えられる。したがって、攪拌を用いた場合は攪拌の影響を補正する必要がある。

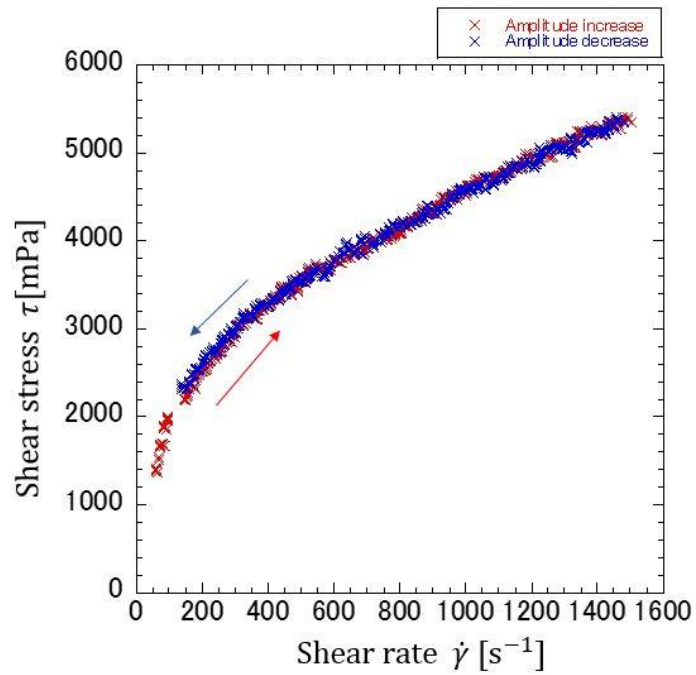


Fig. 5-13 Flow curve at packing factor 25% of polyamide particle with stirring

5.3 スラリーアイスを使った粘度測定実験

スラリーアイスの実験結果を Fig. 5-14 に示す. 粘度測定前のスラリーアイスの様子を Fig. 5-15, 粘度測定後のスラリーアイスの様子を Fig. 5-16 に示す.

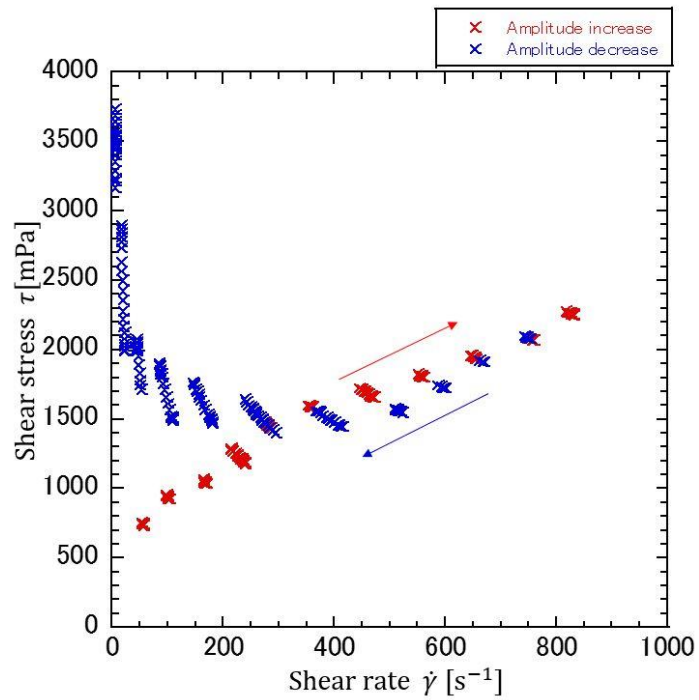


Fig. 5-14 Flow curve of slurry ice

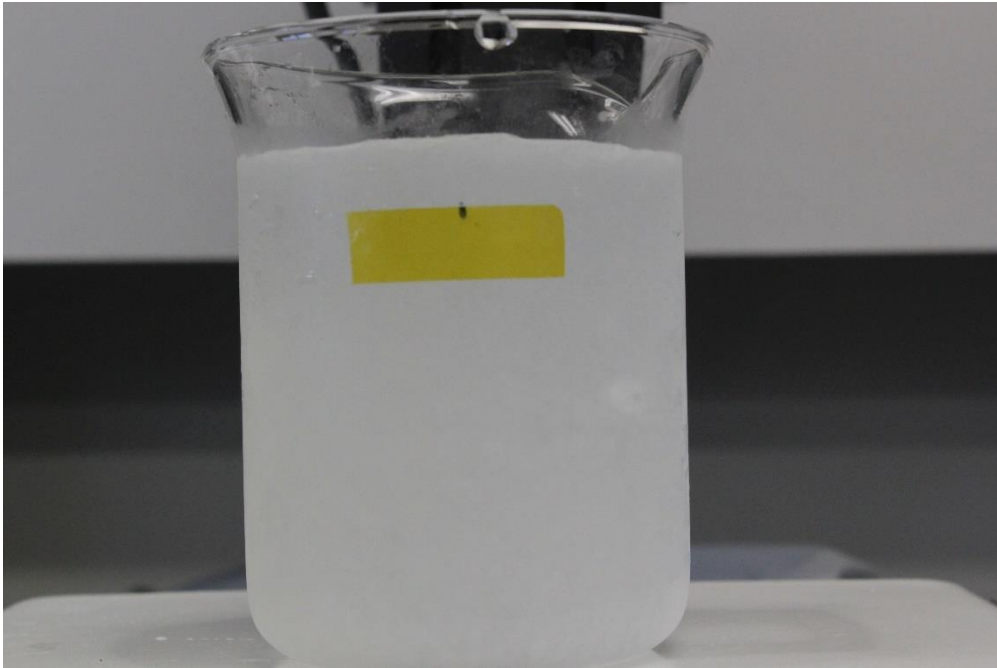


Fig. 5-15 Slurry ice before the experiment

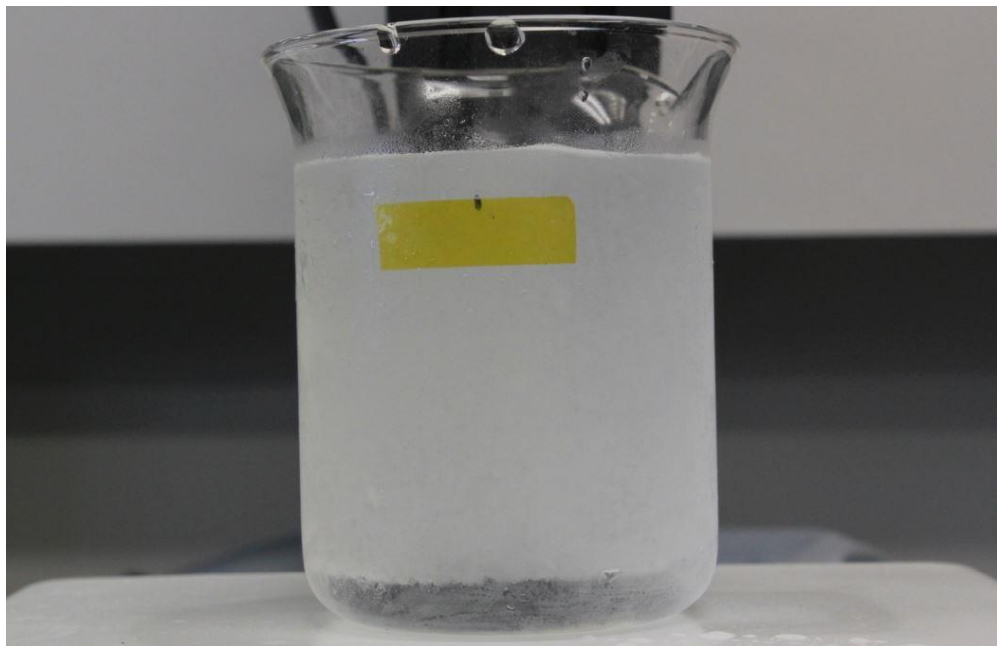


Fig. 5-16 Slurry ice after the experiment

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。粘度測定前は Fig. 5-15 のように攪拌により、氷粒子が一樣となっているが、粘度測定後は氷粒子が浮遊し、Fig. 5-16 のように試料の下部において液相ができていることが確認できる。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大きくなり、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、せん断流れ場により分散効果が勝り、氷粒子が分散しているのではないかと考える。スラリーアイスでの実験結果から今回は振幅を増加させているときの結果に対して近似を行った。キャッソンプロットをしたものを Fig. 5-17 に示す。

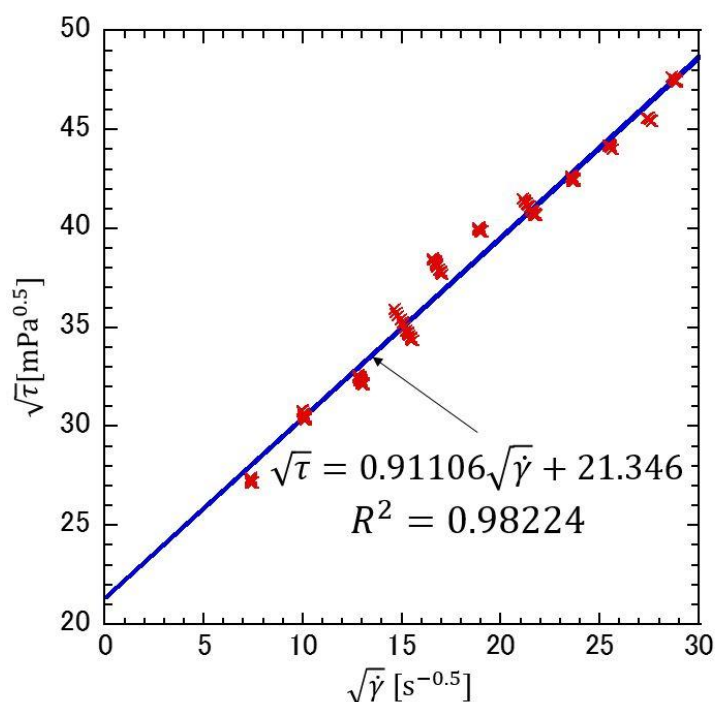


Fig. 5-17 Casson plot with packing factor 26.7% of slurry ice

近似線の結果から傾きと切片より、*a*と*b*の値を求めることが出来る。よって、

$$a = 0.91106, \quad b = 21.346$$

のような結果となった。このことから、スラリーアイスの実験結果から

$$\sqrt{\tau} = 0.91106\sqrt{\dot{\gamma}} + 21.346$$

という数式を求めることが出来る．求めた数式 $\sqrt{\tau} = 0.91106\sqrt{\dot{\gamma}} + 21.346$ とスラリーアイスの実験結果に関して，縦軸にせん断応力[mPa]，横軸にせん断速度[s⁻¹]でプロットしたものを Fig. 5-18 に示す．

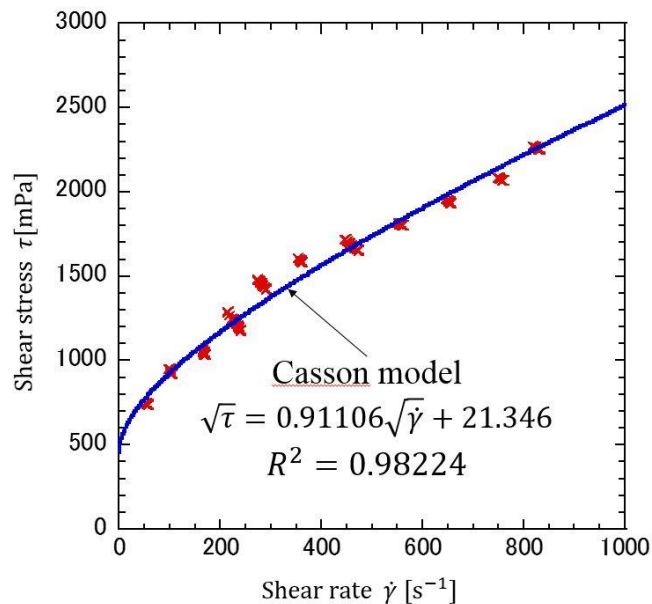


Fig. 5-18 Casson model and flow curve at packing factor 26.7% of slurry ice

ポリアミド粒子のときと同様に Herschel-Bulkley 式を用い，近似を行った．降伏応力は 100mPa から 500mPa まで 50mPa 刻みで代入した結果，250mPa の際に最も相関が見られた．

降伏応力を 250mPa とし，累乗近似を行った結果を Fig. 5-19 に示す．

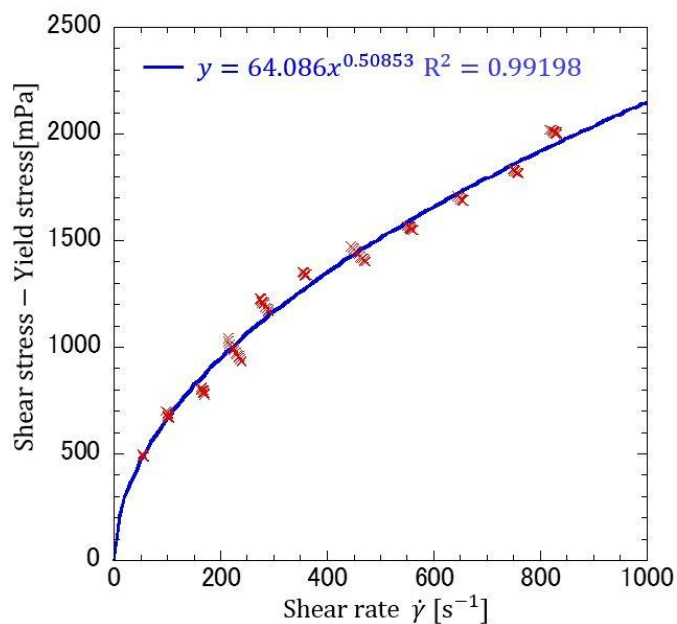


Fig. 5-19 Yield stress 250[mPa]

近似曲線から降伏応力を 250mPa とした際の数式は,

$$\tau = 250 + 64.086\dot{\gamma}^{0.50853}$$

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, プロットすると Fig. 5-20 のようになる.

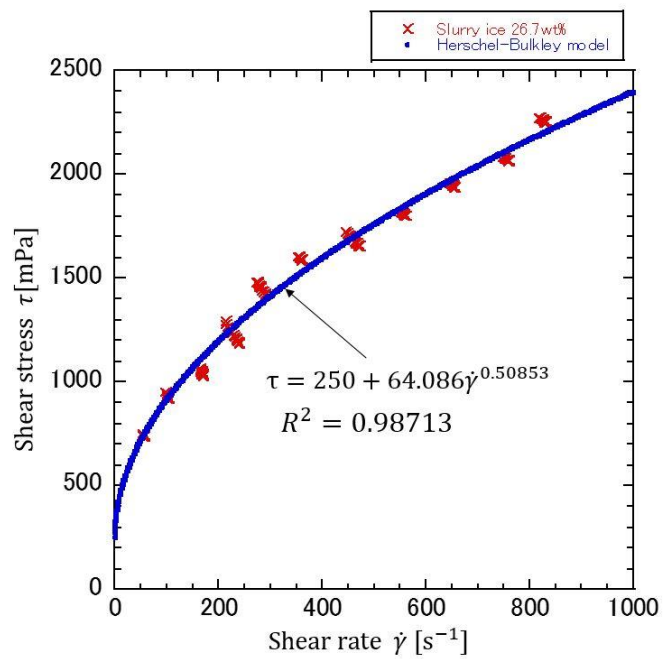


Fig. 5-20 Herschel-Bulkley model

第6章 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イスを試料とし、流動特性の検討を行った。ポリアミド粒子は粒子の影響によって各充填率で異なる流動曲線を示す結果となった。Casson 式を用いて近似をすることにより、シミュレーション解析に必要な数式が求めたが、せん断速度が低い範囲では実験結果と誤差が大きくなる結果となったので、Herschel-Bulkley 式を用いることで Casson 式に比べ実験結果と相関が見られる数式を求めた。また、ポリアミド粒子に関して攪拌を行いながら粘度測定をすることによってスラリー状の流体が凝集することなく、粘度を測定することが可能となるが、振動子に加振力を与える際に、攪拌によって抵抗が加わり、その誤差が粘度値として表れてしまっている。そのため、攪拌を用いて粘度測定を行う際は、攪拌の影響を補正する必要がある。

スラリーアイスを用いた粘度測定実験では自ら *IPF* を調整し、スラリーアイ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イスを取り出し、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とは異なり、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ため、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、せん断速度が大きい範囲ではせん断凝集よりも分散効果が大きくなり、氷粒子が分散しているが、せん断速度を下げるとせん断凝集による影響が大きくなり、氷粒子が凝集していくことから、氷粒子が一様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。

スラリーアイスに関しての数式を得られたが、スラリーアイスの状態によって結果が変わってしまうため、氷粒子が一様になるような粘度測定システムを構築しなければならない。

参考文献

- 1) 渡邊悦生 魚介類の鮮度と加工・貯蔵 東京水産大学第 21 回公開講座 pp.1-11
- 2) 魚介類の死後硬直と鮮度(K 値)の変化
東海大学, pp.7- pp.14
- 3) 松本泰典, 黒原健朗, 下元道夫, 多田昭介, 山口薫, 中越竜夫, 北村和之 マルソウ
ダガツオ(メジカ)の鮮度保持法の検討 高知工科大学紀要 第 8 巻第 1 号別冊
pp.199-206
- 4) 永田聡 スラリーアイスダイレクト生成構造に関する研究(2017), pp.2- pp.11
- 5) ジュンツウネット 21
<https://www.juntsu.co.jp/qa/qa1608.php>
- 6) 振動式粘度計で測定される物理量について (株)エーアンドディ 設計開発本部 出雲直
人, pp.3
- 7) 静粘度 [sv] と振動式粘度計について (株)エーアンドディ 設計開発本部 出雲直人、小
岩井淳志, pp.4
- 8) 椿淳一郎, 森隆昌, 佐藤根大士: 基礎スラリー工学, pp.99

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導，ご教授頂きました高知工科大学システム工学群 松本泰典准教授に深く感謝いたします。また，ものづくり先端技術研究室の皆様には御指導御鞭撻を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。