

卒業論文要旨

対象物のスラリーアイス沈下法に関する研究

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1240174 湯浅 永恋

1. 緒論

スラリーアイスとは、氷粒子径が約 0.2mm の微細な氷粒子と溶液が懸濁した液状氷である。同体積の砕氷と比べ比表面積が大きく、周囲との熱交換が多くなるため融解が起りやすい。そのため、氷の融解潜熱を利用して魚介類を急速に冷却することができる。また、スラリーアイスは氷充填率が 30wt%以下で流動性をもち、塩分濃度によって希望する温度帯での供給が可能であることも特徴としてあげられる。スラリーアイスを用いることで生鮮魚介類の凍結温度に近い温度帯で凍結させず保存することが可能である。しかし、現在、生成したスラリーアイス内に生鮮魚介類を投下した際、魚種によっては沈下せず、冷却が行えないという問題が生じている。

先行研究¹⁾において、バブリングによって沈下対象物を沈下させることに成功した。バブリングはスラリーアイスの下から上方にエアを送ることによって行われた。先行研究で用いた沈下対象物は体積 165ml の円筒容器を用いて行っており、魚と比較すると、容積や形状、密度等が異なるため、沈下しない可能性がある。本研究では実際の魚を想定した形状の模型を製作し、魚介類を傷つけず、スラリーアスを流動化させ、スラリーアイス内に沈下させる装置の検討を目的とした。

2. 流動化の必要性の試算

2.1 目的

魚の種類によるが、スラリーアイス内に魚が沈下しないことが確認されている。これは、魚の密度が足りないためであると予想される。そこで、魚が沈下するために必要な最小密度を明らかにすることを目的とした。

2.2 沈下対象物に加わる外力との関係

沈下対象物(魚)を楕円体とみなし、浮力の釣り合い式を用いて静止状態下での沈下対象物に働く外力との関係式を導いた。沈下対象物に加わる外力 W_0 [N]、沈下対象物の重量 B_0 [N]、氷層重量 B_i [N]、全体の浮力 F [N]の関係を図 2 に示す。

浮力の釣り合い式は、

$$F = B_0 + B_i + W_0 \quad (1)$$

となる。

沈下対象物の重心位置が水面上にあるとして、沈下対象物断面の短半径 a [m]、沈下対象物の長半径 h [m]、沈下対象物の全長 b [m]とおいた(図.1)。スラリーアイスの密度 ρ_i [kg/m³]、NaCl 水溶液の密度 ρ_l [kg/m³]、沈下対象物の短直径 A [m]、沈下対象物の長半径 h [m]と氷層厚さ h_s [m]を足した長さを H [m]とした。氷充填率(以下、*IPF*, *Ice Packing Factor*)とは、水溶液内に占める氷の重量割合のことである。

式(2)から、浮力の釣り合い式は、

$$4\rho_l ab(h+h_s)g = \rho_0 \frac{2\pi abh}{3}g + \rho_i \left[4ab(h+h_s) - \frac{2\pi abh}{3} \right]g + W_0 \quad (2)$$

となる。つりあいがとれている静止状態は $W_0=0$ のときであり、 ρ_0 は、

$$\rho_0 = \frac{3}{2\pi h} \left[\frac{4\rho_l^2 IPF \cdot H}{\rho_i} + 4\rho_l h - \left(4 - \frac{2\pi}{3} \right) \rho_i h - 4\rho_l IPF \cdot H \right] \quad (3)$$

である。式(3)を用いることによって沈下対象物の必要最小密度を求めることができる。

Cross-sectional view of subsidence object

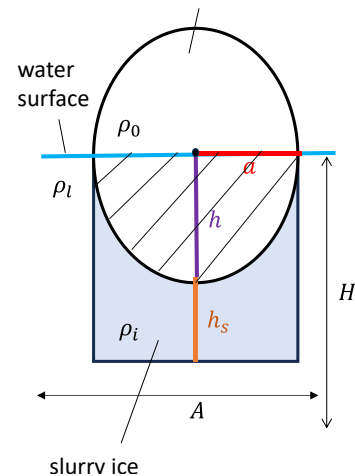


Fig.1 Cross section of a fish with its center of gravity above the water surface

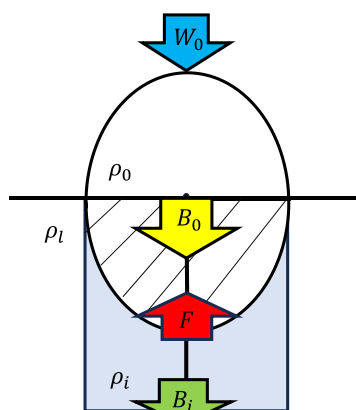


Fig.2 Diagram of the equation relating the external force applied to the settlement object to the external force applied to the settlement object.

2.3 魚の沈下に必要な最小密度

魚が静止状態で沈下するために、必要な最小密度を式(3)から求める。スラリーアイスの密度 ρ_i [kg/m³]については、粒子群の集積特性(Table.1)にしたがう。

Table1 Accumulation characteristics of particle swarms²⁾

正方形	立方配列 $\alpha = 90^\circ \gamma = 90^\circ$ $\beta = 90^\circ \theta = 90^\circ$	正斜方配列 $\alpha = 60^\circ \gamma = 90^\circ$ $\beta = 90^\circ \theta = 60^\circ$	菱面体配列 $\alpha = 60^\circ \gamma = 90^\circ$ $\beta = 60^\circ \theta = 54^\circ 44'$
	正斜方配列 $\alpha = 90^\circ \gamma = 60^\circ$ $\beta = 90^\circ \theta = 90^\circ$	菱形四面体配列 $\alpha = 60^\circ \gamma = 60^\circ$ $\beta = 104^\circ 29' \theta = 63^\circ 26'$	菱面体配列 $\alpha = 60^\circ \gamma = 60^\circ$ $\beta = 90^\circ \theta = 54^\circ 44'$
六方形			

各粒子群の配列ごとの空げき率 x [-], 充填率 y [-], 氷密度 0.917g/cm³, 水溶液密度 1.003g/cm³からスラリーアイスの密度を求めると,

$$\rho_i = 1.003x + 0.917y \quad (4)$$

となる。したがって、式(4)から各粒子群の配列ごとの沈下対象物の沈下に必要な最小密度を求める。沈下対象物の全長を 30cm とし、IPF = 30wt%のときの計算値を表 2 に示す。沈下するために最低でも 1100kg/m³が必要である。世の中によく流通しているタイセイヨウサバの寸法を例にとり、算出した魚の密度と比較する。タイセイヨウサバは平均体長 30cm, 重さ約 0.9kg, 密度 877kg/m³である。沈下対象物の最小密度を考慮すると、どの粒子群の配列と比較しても魚の密度が不足していることが分かる。これより、魚のみの自重では沈下できないため、沈下方法の検討が必要であることが分かる。

Table2 Settling objects for each array of particle groups

粒子群の配列名	スラリーアイス		対象物 必要密度[kg/m ³]
	空げき率[-]	充填率[-]	
立方配列	0.4764	0.5236	1100
正斜方配列	0.3954	0.6046	1115
菱面体配列	0.2594	0.7406	1140
正斜方配列	0.3954	0.6046	1115
菱形四面体配列	0.3019	0.6981	1132
菱面体配列	0.2594	0.7406	1140

3. 沈下対象物による沈下実験

3.1 目的

作成した沈下対象物を用いて、バブリングを行い、実際の魚を想定した最適なエア流量を求めることを目的とした。また、体積、密度についても変化させ沈下時間の比較を行うこととした。

3.2 沈下対象物

魚形状の沈下対象物を 3D プリンターを用いて作成した。沈下対象物に空洞部分を作り、重心の安定、密度調整のために、金属の丸棒を挿入できるようにした。図3に示すように、挿入する丸棒を変更することで、密度調整が可能である。

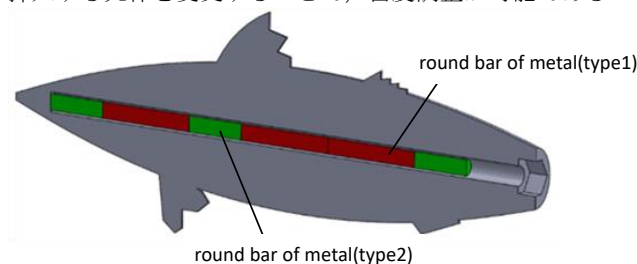


Fig.3 Fish model structure

3.3 実験手順

3.3.1 実験装置および実験手順

実験フローを図 4 に示す。コンプレッサから出た圧縮空気の流量はエアバルブを用いて調整した。また、エアバルブの先に配管を 2 つに分岐させ、配管の先に流量計(キーエンス, FD-A100)を設置した。流量計の先に六カ所穴を開けたアルミパイプを取り付け、タンク底面に設置した(図 5)。エアはアルミパイプに開けた空気孔を通り上方に噴出される。

測定 IPF は、20wt%, 25wt%, 30wt% の 3 種類とし、測定エア流量としては、40L/min, 50L/min, 60L/min, ... 180L/min, 190L/min とした。実験方法については、まずタンク内に塩分濃度 1wt% の NaCl 水溶液を貯水し、製氷機を用いてタンク内にスラリーアイスを生成した。そして、スラリーアイスを水槽に移し、全体的に氷粒子と NaCl 水溶液が混合するようにした。次に、コンプレッサを用いて、エアを送りエアバルブを調整し、バブリングを行った。流量計でエア流量を測定し、流量が安定した後、水槽内のスラリーアイス上の中心に沈下対象物を設置した。バブリングの状態は動画撮影し、沈下対象物がスラリーアイス内に沈下するまでに要した時間を計測した。

実験条件を表 3 に示す。沈下対象物は大, 中, 小の 3 種類作成した。沈下対象物大は、実際の魚介類の体積を想定し、沈下対象物中は、形状による沈下時間の変化を比較するため、先行研究の体積に近いものを作成した。また、沈下対象物小は、沈下対象物中に対して重量は同じとし体積を変化させたものを作成した。各沈下対象物はサイズごとに 50g ずつ重量を加えた。

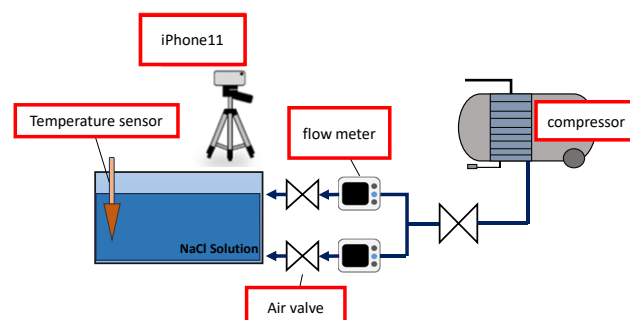


Fig.4 Experimental apparatus flow

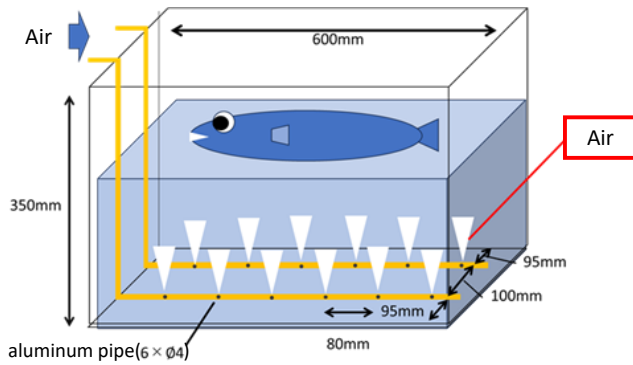


Fig.5 Location of aluminum pipe installation

Table.3 experimental conditions

沈下対象物	サイズ	大	中	小
	体積[ml]	601	178	64
	重さ(軽)[kg]	0.5	0.15	0.1
	重さ(中)[kg]	0.55	0.2	0.15
	重さ(重)[kg]	0.6	0.25	0.2
	密度(軽)[kg/m ³]	831.95	842.70	1562.50
	密度(中)[kg/m ³]	915.14	1123.60	2343.75
	密度(重)[kg/m ³]	998.34	1404.49	3125.00
雰囲気温度[°C]		15		
計測IPF[wt%]		20, 25, 30		

3.4 実験結果

3.4.1 各沈下対象物の沈下時間

IPF ごととのエア流量と沈下時間の関係を、図 6～図 8 に示す。全沈下対象物が 30 秒以内に沈下するために必要なエア流量は、IPF = 20wt% では 60L/min, IPF = 25wt% では 120L/min, IPF = 30wt% では 120L/min であった。

実験中の目視による観察では、沈下対象物の体積ごとに沈下する様子が異なった。スラリーアイスは時間経過すると上部に氷層を形成した。沈下対象物(小)(中)では、バブリングにより氷の層が破壊され、氷層が薄くなった場所から沈下していった。沈下対象物(大)では、バブリング直後には沈下が見られず、エアによって浮上する現象が見られた。その後、噴出されたエアが直接あたらない場所に移動し、他の沈下対象物と同様に沈下した。また、噴出されたエアにより、氷が水槽の端に堆積し凝固する様子も見られた。

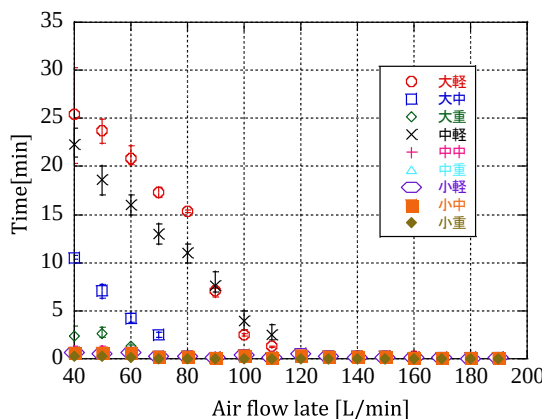


Fig.6 Relationship between air flow rate and bubbling time required for settling (IPF30wt%)

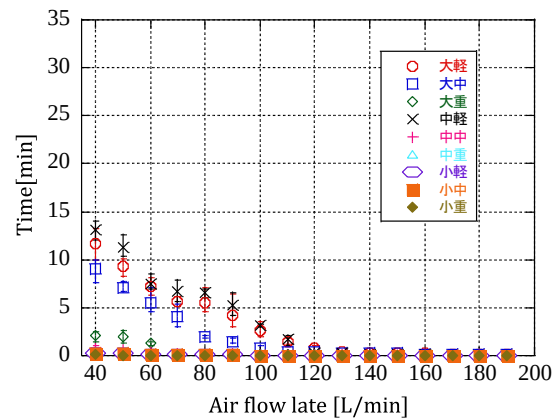


Fig.7 Relationship between air flow rate and bubbling time required for settling (IPF25wt%)

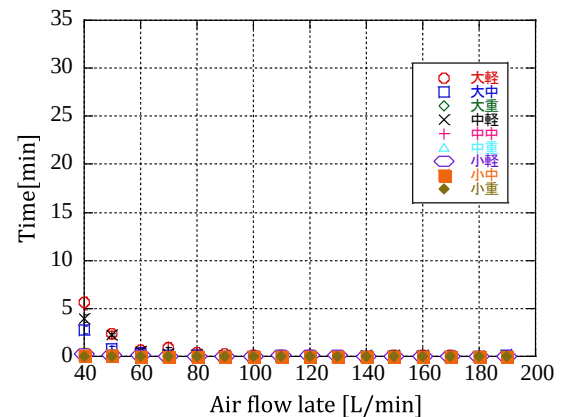


Fig.8 Relationship between air flow rate and bubbling time required for settling (IPF20wt%)

3.4.2 先行研究との比較

先行研究の沈下対象物は体積 165mL, 重量 0.163kg, 密度 998.79kg/m³である。本実験での沈下対象物(中軽)は、体積 178mL, 重量 0.15kg, 密度 842.697kg/m³である。図 9, 図 10 より本実験と先行研究を比較すると、本実験の沈下対象物は、先行研究よりも約 10 倍沈下するのに時間を要した。

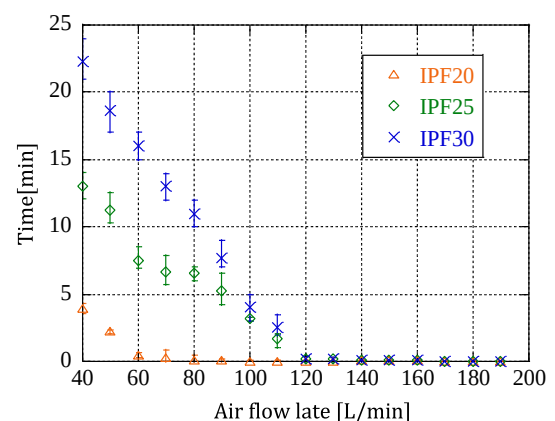


Fig.9 Settling time for this experiment

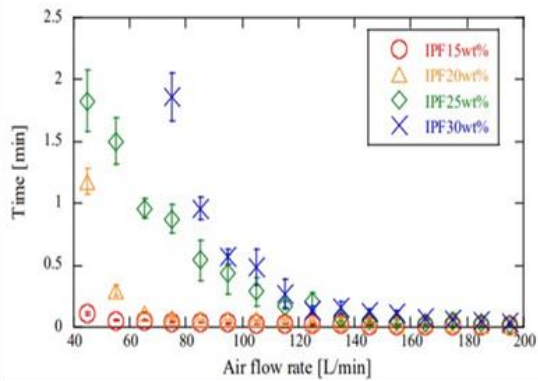


Fig.10 Settlement time of previous studies¹⁾

3.4.3 温度の経時変化

バブリングにより空気が氷に送られるため、氷が融解しスラリーアイスが変化する可能性がある。本実験の最大エア流量 190L/minでのバブリングによる各IPFにおけるIPFの変化を図 11,温度変化を図 12 に示す。図 11,図 12 よりバブリングにおける氷の融解、スラリーアスの温度への影響は見られなかった。

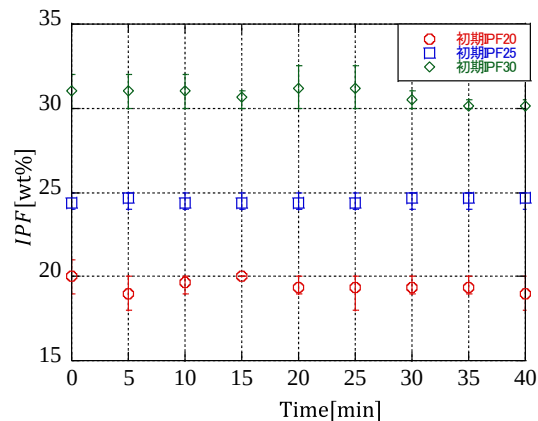


Fig.11 Change over time in each IPF

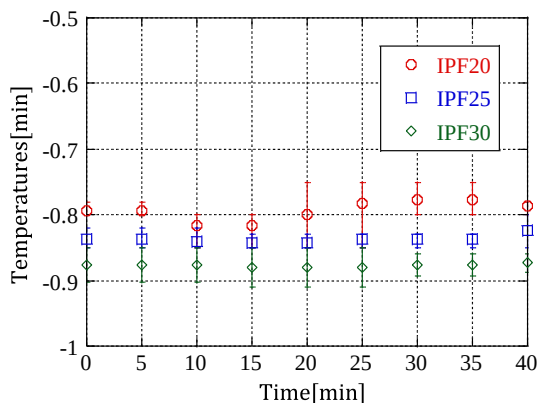


Fig.12 Temperature variation at each IPF

3.5 考察

図 6～図 8 より沈下対象物の体積、密度、形状を変化させても、バブリングを用いた沈下方法は有効であるといえる。しかし、図 9、図 10 より同密度でも形状が異なると沈下時間に大きな差が見られた。魚の形状では、円筒形状と比較してスラリーアイスに接する表面積が大きくなる。そのため、沈下対象物がスラリーアイスに与える圧力が小さくなり、沈下時間に影響を及ぼしたと考えられる。また、表面積の変化に伴いエアを受ける面積が増加し、沈下方

向とは逆向きの力が大きくなったことも要因の一つであると考えられる。

氷粒子がエアによって水槽の縁に寄せられ、局所的に堆積し凝固する様子が見られた。それによってエアによって水槽の縁に寄せられた沈下対象物が氷とともに凝固し、沈下の妨げになったと考えられる。バブリングによって氷粒子が凝固することを防ぐ方法の検討が必要であると考えられる。

4. 結論

本実験では実際の魚を想定した形状の模型を製作し、魚介類を傷つけることなくスラリーアスを流動化させ、実際の魚介類をスラリーアイス内に沈下させる装置を検討することを目的とした。

まず実際の魚を想定した流動化の試算では、粒子群の集積特性に従い、魚の沈下必要最小密度を求めた。そこから、魚の自重では沈下しないことを確認し、沈下方法の検討が必要であることが分かった。

魚を模した沈下対象物を用いたバブリングによる沈下実験では、密度、体積を変更しても、バブリングによる沈下は可能であるという結果が得られた。また、魚形状によってスラリーアイスに接する表面積が大きくなることによって、沈下対象物の沈下時間に影響を及ぼすことが分かった。さらに、バブリングによって局所的に堆積するスラリーアイスが沈下対象物の沈下に影響を及ぼすことを確認した。

今後はエアによる力が沈下対象物の沈下時間に影響を及ぼすため、エアの噴出方法の検討が必要であると考えられる。また、沈下対象物の沈下時間の妨げになっている氷粒子の凝固を防ぐ方法の検討が必要である。

参考文献

- (1) 林 佳奈, スラリーアイス流動化における対象物の浸漬法に関する検討(2017)
- (2) 三輪茂雄, 粉体工学通論, 日刊工業新聞社 p33