

溶融したパラフィンの凝固現象

岸 本 健^{*1}, 浜 野 雅 夫^{*2}, 石 田 隆^{*2}

Study of Solidification of Melted Paraffin in Horizontal Cylindrical Container

Ken Kishimoto^{*1}, Masao Hamano^{*2}, Takashi Ishida^{*2}

Abstract: This paper reports about the cooling of paraffin in horizontal cylindrical container. In this cooling process, the temperature change of paraffin in liquid and solid had made an interesting behaviors. We have analyzed this phenomenon using super-cooling and freezing point depression and explained reasonably and simulated successfully.

Key words: phase change, thermal non-equilibrium, supercooling, freezing-point depression

1. はじめに

この研究は、大型の水平置円筒型のタンクに溶融した植物性パラフィン状脂肪酸を充填したとき、タンク内部の液状パラフィンの凝固過程を推定するというものである。最終の20kLタンク（外形φ2.30m）での凝固過程を定めた温度に到達するまでの時間を、実験に対して5%以下の精度で正確に予測することを目的として研究を行う。

この予測に供するため、内容量が4L, 20L, 200Lのタンクを用いて実験を行うことで、冷却過程のデータを採取し、冷却モデルの未定係数を決定して、自然対流によるタンク内の流動と冷却過程の時間経過と、凝固の割合を計算で明らかにした。

通常モデルでは、コップに入った水を冷凍庫中で氷にする問題と同じであり、0℃の融点以上にある水が冷却されると、熱平衡のため、すべてが氷になるまで水+氷の温度は融点にとどまり、全て氷になると更に冷却によって温度が低下してゆくという現象が予測されるが、容器に入った液体状態にあるパラフィンの冷却に伴う固化状態を実験で観察すると、この水の冷却とは異なる状態が観察されたので、その観察結果とともにモデル化による計算結果を報告する。

2. モデル

円筒型モデルを図1に示す。内容量20Lの水平円筒容

器であり、中に液状のパラフィンが充填されている。上部には凝縮に伴う体積変化を吸収するためにわずかに空気層があるが、モデルとしては無視する。容器の側壁及び端板は、薄いSUS製である。容器の外側は保温のために厚み50mmのロックウールが貼り付けてある。ロックウールの外はSUS板で包まれている。

図1に温度測定点を示した。円筒の軸方向には対象であるとして、タンクの半分に、9点の測定点を設けている。

3. 実験

実験は、図1に示す容器に高温の溶融したパラフィンを満たして実験を開始する。容器がパラフィンと同じ温度になるように、容器は実験前に加熱しておく。また、9箇所の温度測定箇所にはK熱電対をセットして自然放置し、温度が降下していく過程を測定する。パラフィンは37.5℃で固化が開始するので、容器内のほぼすべてのパラフィンが固化するまで、約100時間計測を続ける。また、冷却過程は容器の周囲の空気温度や気流速度に依存するため、無風で20℃に保った室内で実験を行った。

また、両端板にはガラスの観測窓を設けて、凝固の過程を観察できるようにしている。

図1に示す円筒型容器の冷却温度変化を調べる前に、予備実験として、図2に示す内容積4Lのガラスびん(193mm×157mm[□])を用いた。

3.1 温度変化

予備実験での温度測定点は図2に中心を通る面に垂直方向に7点、水平方向に4点の合計10点（CH4は共通

^{*1} 国士舘大学理工学部機械工学系

^{*2} (株) G-Bio イニシアティブ

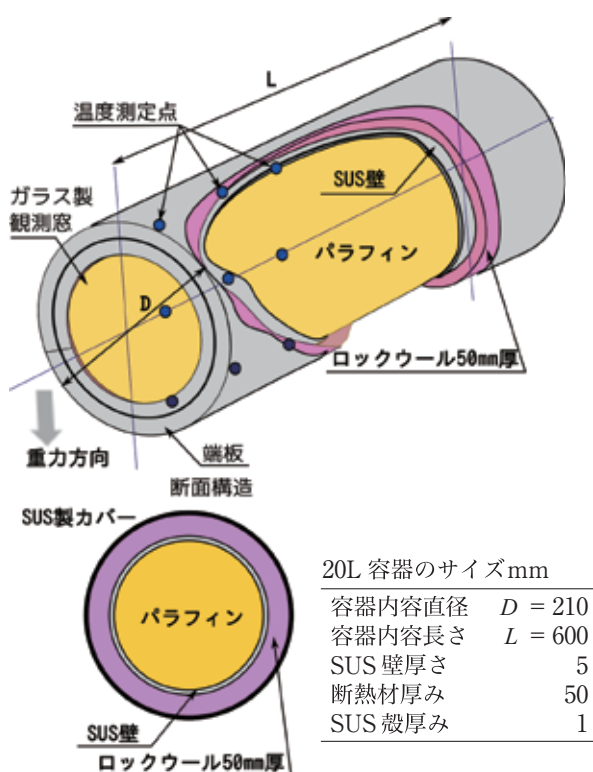


図1 20L円筒型モデルの構造

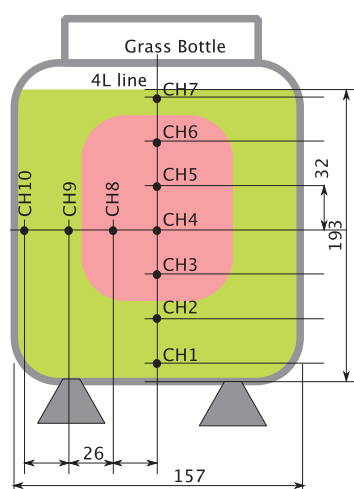


図2 4Lタンク（ガラスボトル）

点)で、保温した場合と、保温しない場合の冷却過程の温度変化を調べた。その温度測定点での温度の記録を図3、4に示す。図3は容器を保温しない場合であり、図4は容器に50mm厚のロックウールの保温層がある場合である。実験の関係上、保温なしのケースは4Lのガラス瓶である。また、それぞれの測温点は図2に示した。

保温しない場合は容器の壁から、直接外気に放熱する。そのため、壁に近い測温点は中心部より低い温度を示し、中心部は温度が高い。各点の温度分布は壁に近いグループ、その内側のグループ、中心部分のグループと3つに明確に分かれている。しかし、保温した場合には、

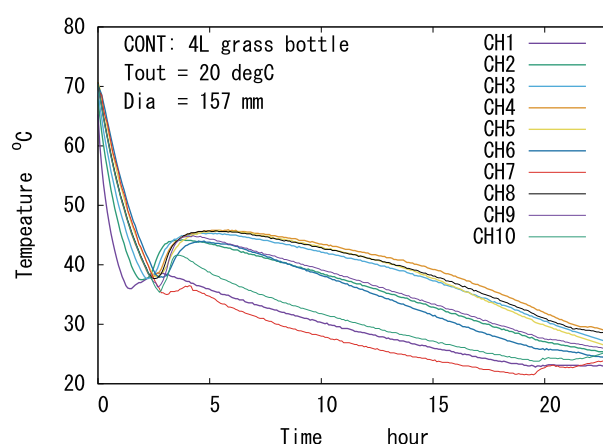


図3 容器を保温しない場合の温度変化4Lタンク

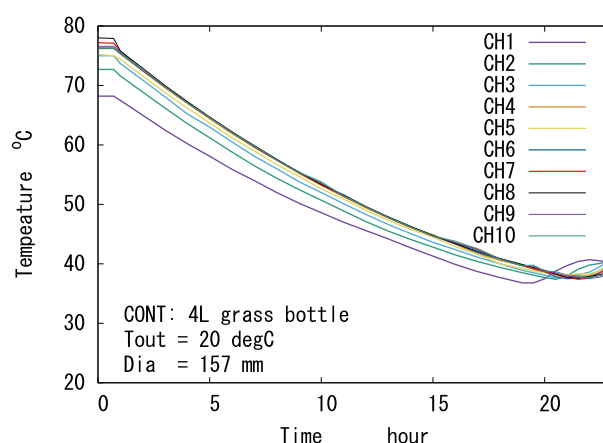


図4 容器を保温した場合の温度変化4Lタンク

図2に示した測温点すべてでの最大温度差は初期に10℃であるが、容器内は周辺と中心の温度差がほとんどない状態で低下している。ほぼ局所温度分布は一樣を保ちながら変化してゆく。

この温度カーブから次のことがわかる。

- 保温しない容器では、容器内に大きな温度偏差が生じる。つまり、周囲の冷却面に近い場所では温度は低いまま推移し、中心部は温度が高い状態で温度低下してゆく。
 - 容器外周を保温することで冷却速度は遅くなる。また、容器内温度の偏差は保温によって小さくなり、中心部ではほぼ一樣に変化する。
 - 保温の有無に関係なく、共通に、パラフィンの融点である37.5℃に温度低下が達したのち急激に温度上昇する。保温しない場合には、この温度上昇は約46℃に達し、9℃も上昇する。保温している場合は、42℃となり、約5℃の上昇でその割合も小さいが、同じように一旦上昇する。
 - 上昇した温度は、最初の冷却による温度降下速度よりも緩い速度で温度降下する。
- 以上のように、単純ではない現象と考えられる。これ

らの現象に最初の定性的な問題を提示する。

- 保温によって、容器内温度が一樣となることは、非常に遅い熱流束に比較して、大きな熱伝導率による温度平滑作用が考えられる。自然対流による攪拌作用も温度を一樣にする要因であると思われるが、融点以下の温度では、凝固が始まり固化したパラフィンが多くなるために流動の影響は考えにくい。
- 実験開始後、融点に達するまでは、容器内全体は液状であるために低下するが、融点に達すると、液体は凝固熱を奪われて凝固する。凝固した固体と液体間には熱平衡が成り立つ。パラフィンは複数の凝固点のことなる複数の成分の混合物であるので、凝固に伴い、凝固しない液体成分の凝固点は低下する。そのため、図3や図4のように、熱平衡にありながら徐々に温度低下する。
- 凝固点に達した温度は、その後上昇する。これはパラフィンの凝固が熱的に非平衡で進行することを示している。

円筒形容器での保温の有無についての温度変化の履歴を比較するデータはないが、図1のモデルの保温時の温度履歴は図6に示す。20L円筒形タンクの温度センサーの位置は容器の半分の図5に示すように、9点であ

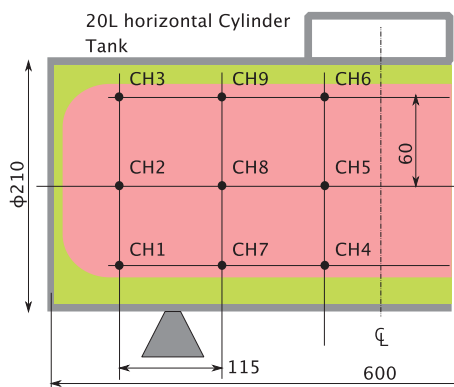


図5 20Lタンク（水平ステンレス容器）半分

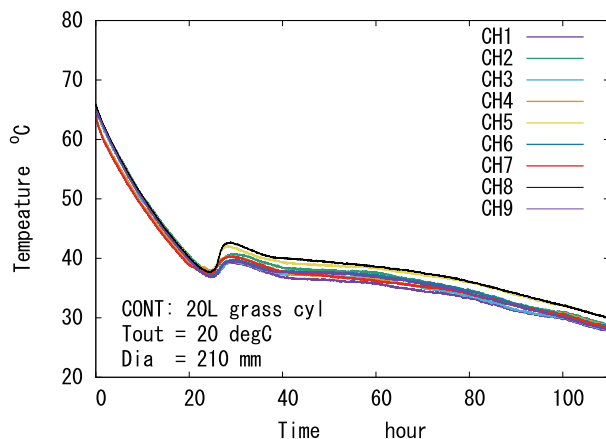


図6 保温した20L容器内のパラフィンの温度変化

る。図6のように、保温したガラス容器の温度変化よりも各点ごとの温度差は小さく、容器内はほぼ一樣の温度分布で冷却が進んでいることがわかる。

4. 実験結果の考察

4.1 凝固現象

20℃に保った室内に図1のような水平横置き円筒容器内に、温度約70℃に熱した溶融したパラフィンが充填されている。この容器は周囲および端版をロックウール層で保温されているが、ロックウール層外ではわずかな熱伝達によりゆっくりと冷却されてゆく。このパラフィンは、物性値である融点温度 T_{melt} になると凝固し始めるが、このパラフィンは、単一物質ではなく、多種の高分子油脂の混合物であり、それらの成分ごとに凝固点は異なっている。

そこで、表1に示した。表中で対応する物質は植物脂肪酸でありパラフィンではないが、使用しているパラフィンを構成する物質として物性値の同じ物質として対応させている。

そのため、高融点の成分が析出しはじめ、高融点成分の融点で熱平衡を保ちながら固化が進む。

4.1.1 保温した容器内の容器内の現象解説（その1）

この凝固のメカニズムで解釈のために必要な物理的現象への理解は次の通りであると考えた。自然対流温度解析によって得られた液相の自然対流速度ベクトル²⁾に、凝固の状況を重ねあわせたスケッチを図7と図8に凝固の状態を示した。 x 流動ベクトルは左右対称であるので、右半分にだけ書き入れた。200Lの円筒型容器（φ508×1230）での凝固や水の凝固がこの様式で凝固する。

- 凝固成分を含んだ自然対流溶融パラフィンの密度は温度によって変わる。この論文で対象としている温度範囲は比較的小さい（20℃～80℃程度）ため、密度は温

表1 パラフィン、植物性脂肪酸の物性など¹⁾

物性など 単位	A	B	C
構成割合 kg/kg	0.60	0.35	0.05
分子量 kg/mol	256.4	282.4	284.5
密度 (液) kg/m ³	853.0	895.0	882.8
密度 (固) kg/m ³	920.4	—	965.0
比熱 (液) J/kgK	1807	2135	2300
比熱 (固) J/kgK	(1762)	—	1762
熱伝導率 (液) W/mK(70/100℃)	— q	0.2121	0.173
熱伝導率 (固) W/mK(25/50℃)	(0.29)	—	0.29
融点 °C	62.9	13.4	69.55
融解熱 kJ/kg	163.9	140.2	198.9

() は不明なため物質 C と同じとした

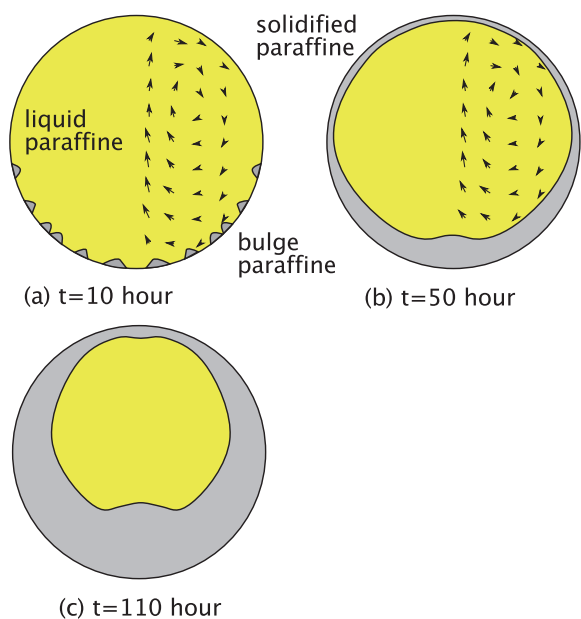


図7 円筒内でのパラフィンの凝固過程のスケッチ (その1)

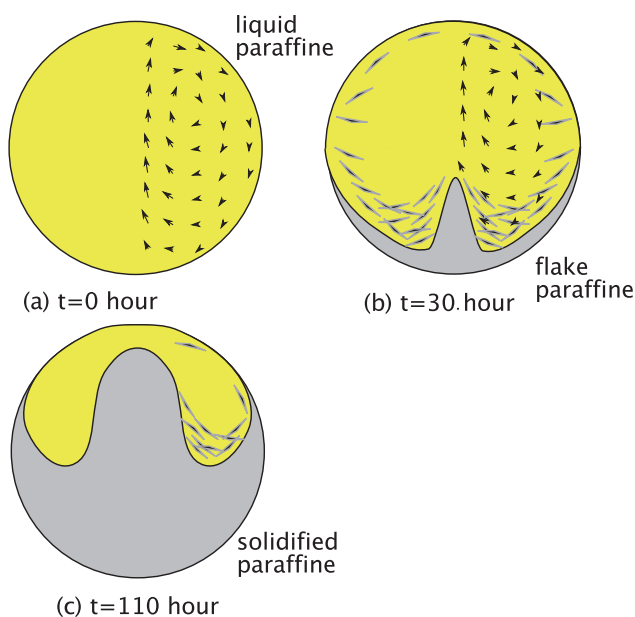


図8 円筒内でのパラフィンの凝固過程スケッチ

度に対して線形に変化するとしても現象を表すことができる。温度を $T^{\circ}\text{C}$ として、

$$\rho = \rho_0(1 + \beta T) \quad (1)$$

ここで、 $\beta < 0$ であるので、熱せられて軽くなる液体である。また、固体と液体の比重差は表1のように固相成分のほうが重いいため熱的に一様ならば底部にたまる。

- 凝固したパラフィンは、壁面に沿って下降すると共に壁面に付着し始める。はじめ、外壁である円筒側壁に接した溶融パラフィンは冷却されて、図7-(a)のように自然対流で下方に移

動し始める。

壁面を保温しない自然対流による冷却では図7-(a)のように最初は下部の壁面に直径約5mmの凝固した固体片が付着し始める。やがて、図7-(b)に示すように壁面には凝固したパラフィンが生成される。壁面で生成された凝固パラフィンは、氷の凝固のように固化した表面を成長核として冷却に伴って凝固が成長してゆく。そのため、円筒の壁から凝固領域が広がり、やがて、容器内は凝固パラフィンで満たされ、図7-(c)のように円筒中心部分に液体パラフィンが残留する。

保温しない急速なパラフィンや水の凝固は図7に示すような進行をした。しかし、保温した容器内のパラフィンの凝固過程では次節のようにこの様相とは異なる凝固の様子が観察された。

4.1.2 保温した容器内の容器内の現象解説 (その2)

保温した20L容器内のパラフィンの凝固は水の凝固と異なり、次のような現象が起こることが実験で観察された。この解説を行う。

- 高温のパラフィンでは、図8-(a)のように自然対流が起こり始める。これは、水と同じであり、液体の中の温度分布についてもほぼ同じである。
- 融点に近づくと、上部壁面や側面で凝固したパラフィンが生成される。これらの凝固したパラフィンは壁面上および壁面近くの液中で、フレーク状もしくは綿状になる。フレーク状固体パラフィンは液体パラフィンよりも比重が大きいため、比重差で液中を沈降し始める。図8-(b)のように雪が積もるように円筒下部に積もる。この積もったフレークは流れを妨げ、中心の対称軸上に沿う自然対流の上昇流に伴って上部に運ばれ、中心部分に積もり山脈状の固化形状を生じる。
- そして、下部のフレークの溜りは徐々に増加する。対象軸上には上昇流があり、フレークは固体パラフィンが大きな比重を持っても構造が綿状の繊維の集合もしくは雲状であるので、流れに伴って対象軸上に山を作った形で盛り上がり、最終的には上部壁にまで達する。

実験においては上部壁は冷却を受けており液体温度は低いと考えられるが凝固したパラフィンは付着していない。

以上のように、20L容器においては冷却による凝固の様相は水とパラフィンでは大きく異なることが実験によって明らかになった。

4.2 凝固の温度履歴

図4に示すように、温度記録は単純ではない変化をし、ほとんどの温度は10度未満の差で同じ変化をしているため、物理的解釈をするためにはどの点を代表温度

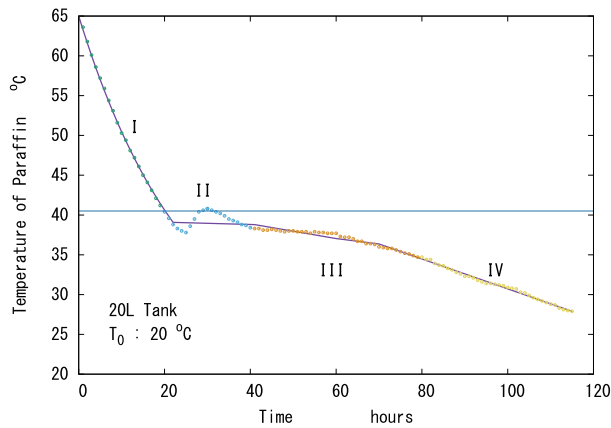


図9 代表的な温度履歴

としても良いが、タンク内の代表的温度として、図5のCH5とする。

タンク内の代表点での温度を図9に示す。この曲線は4つの領域に分けることができる。この領域を図中にI, II, III, IVとした。

I) 液体顕熱冷却過程

パラフィンは全て液体であり、タンク周囲の空気による冷却を受ける。温度変化は外気との差で決まるニュートンの冷却法則に従う領域である。つまり単純に、断熱材を通した放熱によって、パラフィンの温度が低下する領域。断熱材の非定常温度分布を解いて、放熱量を求めるが、準定常温度分布としても、温度分布にはほとんど差がないため、準定常とできる。

II) 過冷却と過冷却崩壊過程

冷却に伴って発生する過冷却現象を呈する領域である。このパラフィンの融点は、公称37.5°Cである。図9の温度変化を見ると、この融点に達した21時間目から40.3°Cまで温度上昇している。パラフィンの過冷却の崩壊を促すため、冷却中に容器を揺るなどの刺激を加えても、この領域が存在するため、水と異なり振動では崩壊しにくい過冷却現象であることがわかる。

III) 潜熱冷却過程

この領域は、熱平衡が成り立つ領域である。液相にあるパラフィンが冷却されて、融点以下に達すると固化する。節5.5に示すように、高融点物質が先に固化するため組成が変化し融点が変わる。

IV) 固体顕熱過程

最後の領域は、IIIと似ているが、IIIの領域が液から固に相変化する熱平衡の成り立つ領域であったが、この領域では、液相となっている部分はほとんど低融点成分であり、高融点成分はほとんど固化している。そのため、IIIの領域より、わずかに温度の傾斜が大きく、冷却速度が速くなる。この領域では、容器の下部には大量のフレーク状の固化成分が蓄積しており、伝熱阻害となっていると考える。

図10 加熱パイプ周りの温度分布（マッハツェンダー写真）⁽⁶⁾

4.3 冷却速度

周囲の冷却は比較的大きな容器であるために、外壁周方向の空気と接する表面では、自然対流熱伝達が角度（高さ）によって分布する。図10はマッハツェンダー干渉計で加熱水平円柱の周囲の温度分布を示したものである。

干渉縞は温度分布に対応する。縞が粗である円柱の最上部約30度は低熱伝達率の領域であるがその他の部分は縞模様は密であり、周方向に変化がなく、熱伝達率はほぼ一定となっている。そこで、周方向の熱伝達の変化は無視することとした。

5. 解 析

以上の結果を受けて、次の仮定をして計算を実施する。

1) パラフィンの温度は、槽内ほぼ一定。

僅かな自然対流と大きなプラントル数 ($Pr = 3.0 \times 10^3$) によって、流動は起こり、槽内の温度分布は均一になる。

2) 断熱層内温度分布は、準定常と考える。

3) パラフィンの凝固速度 dx/dt は、有限の値を与える。

これは、融点に到達してすぐに凝固が始まるのではなく、冷却速度が凝固速度より大きい場合には、過冷却となることを意味する。

5.1 パラフィンのエンタルピー

融解熱を H_m^o とし、 x が固体成分の質量割合とすると、

$$h_{pr} = (1-x)(c_{prl}T + H_m^o) + xc_{prs}T + h_0 \quad (2)$$

と表されるものとする。 c_{prl} は液相の比熱、 c_{prs} は固相の比熱、 h_0 は基準エンタルピーである。

このエンタルピーを微分すると、式(3)のようになる。

$$dh_{pr} = \frac{\partial h_{pr}}{\partial T} dT + \frac{\partial h_{pr}}{\partial x} dx = \bar{c}_o dT - H_m dx \quad (3)$$

この式から、平均比熱 \bar{c}_o と見かけ生成熱 H_m を式(4)のように与える。

$$\begin{aligned}\bar{c}_o &= (1-x)c_{prl} + xc_{prs} \\ H_m &= (c_{prl} - c_{prs})T + H_m^o\end{aligned}\quad (4)$$

この研究で想定しているパラフィン、表1に示す値からおおよそ、プラントル数 $Pr=1800$ であり、 $H_m/\bar{c}_o=90$ であり、水より少し多い。

5.2 温度分布と熱流束

外気温度は一定であり、容器内の液体の温度変化も $dT/dt=2\times 10^{-4}\text{K/s}$ という非常に小さい変化であるので、定常仮定をしても現象を記述できる。

すると、単位長さあたりの熱のバランスから、温度変化を式(5)のように表すことができる。

$$\rho\bar{c}_oV\frac{dT}{dt} = \frac{2\pi(T-T_{sur})}{\frac{1}{r_1h_1} + \frac{1}{\lambda}\ln\frac{r_1}{r_2} + \frac{1}{r_2h_2}} + \rho VH_m\frac{dx}{dt}\quad (5)$$

となる。ここで、 ρ ：液の密度、 V ：円筒1mあたりの体積 $= (1/4)\pi D^2$ である。

5.3 パラフィンの凝固

水の凝固速度⁴⁾を参考にして見積もる。

過冷水の氷化と同様に、パラフィンの固化は、液中に存在するキャビティを核として始まり、その固化速度は、キャビティ密度に比例すると考える。また、キャビティを核として開始する固化の進行速度は過冷却度に比例する。

固化は発熱変化であるので固化によって発熱する。今、過冷却度を $\Delta T = T_{melt} - T_{pr}$ とし、 T_{melt} は融点、 T_{pr} は液相のパラフィン温度、融解熱（凝固熱）を H_m 、液相の比熱を c とすると、 f を凝固する割合とすると、 $c\Delta T = fH_m$ が凝固によって変化する温度であり、負になることはない。つまり、過冷却した場合には過冷却の熱量を固化時の発熱によって、平衡温度である融点にとどまるのであるが、図に示すような温度計測の結果からは平衡状態に留まっていないことがわかる。

液温には直接関係しないが、融点以下になると指数関数でキャビティが増加する。単位体積当りのキャビティ数 n は、式(7)となる。

$$\frac{df}{dt} = K_{01} \exp\left(-\frac{K_{02}}{\Delta T}\right) + K_1f + K_2n\quad (6)$$

$$\frac{dn}{dt} = K_4f + K_5n\quad (7)$$

記号	値	式の番号
K_{01}	6.5×10^{-4}	6
K_{02}	17.0	6
K_1	1.8×10^{-4}	6
K_2	0	6
K_4	3.5×10^{-3}	7
K_5	-6.0×10^{-3}	7

5.4 容器外の熱伝達

円柱が一樣流中に置かれた時は、円柱に当たる周囲流の方向に依存するが、ここではどの方向からの流れに対しても、次のように熱伝達率を与える⁵⁾。自然対流においては、

$$Nu_1 = 0.75 \left(\frac{Pr}{2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5.0Pr} \right)^{0.25} Ra^{0.25}\quad (8)$$

ここで、 Ra ：レーリー数 $(=GrPr)$ である。

また、強制対流の熱伝達率は外部の円柱に直角に当たる風速を v として、レイノルズ数を $Re = \rho v D / \mu$ とすると、式(9)⁵⁾を用いる。

$$Nu_2 = C_1 Re^n\quad (9)$$

この2つの Nu の大きい方を用いて、管外の熱伝達率を計算した。

5.5 融点

混合物であるパラフィンを、冷却すると高融点の成分が析出する。すると、液相中の高融点成分は減少し、液相の成分が変化する。低融点の成分が多くなると、融解温度が低下することになる。

そこで、融点は表1の物質A、B、Cの混合から、簡単に、混合物の元成分の質量分率 g_i で計算する。ここでは、高融点成分A、Cを合わせ、低融点成分をBと2成分とし、

$$T_{melt} = \sum g_i T_{melt,i} = g_A T_{melt,A} + g_B T_{melt,B}$$

この式を、成分Bの成分Aの作用としてみると、Aの質量分率 g_A を用いて、

$$T_{melt,A} - T_{melt} = K_s(1.0 - g_A)$$

となり、表1から、 $K_s=56.2$ である。この現象を凝固点降下とすると、定義³⁾から

$$\Delta T = \frac{MRT_f^2}{\Delta H_f} g_B = K_f(1.0 - g_A)$$

ただし、 ΔT ：凝固点降下の大きさ

g_B ：溶質の質量モル濃度

M ：溶媒の分子量

表2 式(9)中の定数

Re の範囲	C_1	n
$Re < 4.0$	0.891	0.330
$Re < 40$	0.821	0.385
$Re < 4000$	0.615	0.466
$Re < 4.0 \times 10^4$	0.174	0.618
$Re < 25.0 \times 10^4$	0.0239	0.805
$25.0 \times 10^4 < Re$	0.0087	1.250

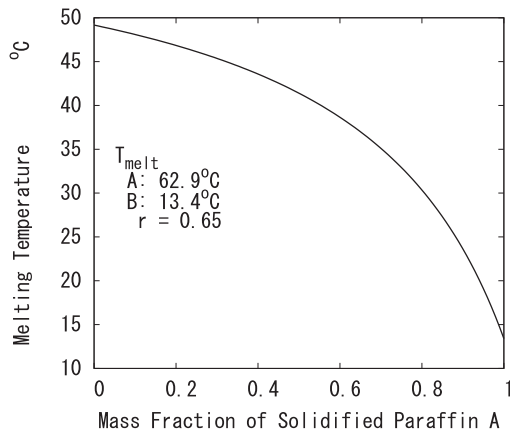


図11 パラフィンの凝固量による融点の変化

R : 気体定数

T_f : 溶媒の凝固点

ΔH_f : 溶媒の凝固熱 (潜熱)

となり, $K_f=52.3^\circ\text{C}$ となり, K_s と近い値をとる。ここでは, 凝固点降下の式に2つのパラフィンの融点を代入して g_A をパラフィン A の質量分率, r をパラフィン A の固化率とし, パラフィン B は A に比べ低融点であるので, パラフィン A が全て固化しても液相であるとして,

$$T_{\text{melt}} = \frac{(1.0 - r^2)g_A}{1.0 - r^2g_A} T_{\text{meltA}} + \frac{1.0 - g_A}{1.0 - r^2g_A} T_{\text{meltB}}, \quad 0 \leq g_A \leq 1.0 \quad (10)$$

を用いた。この変化を図11に示した。冷却初期の $r=0$ のときに, T_{meltA} にならないのは, 初期パラフィン A が重量比で1.0ではないためである。

5.6 過冷却現象

過冷却の崩壊現象は, 凝固がある箇所では連鎖的に他の部分にも伝播し, 凝固熱を放熱し, 温度上昇があると考えられる変化であるが, この考え方には, 熱の保存法則が成り立たない。このパラフィンの融点が 40.3°C であると考えれば, 過冷却による熱バランスは, 液相の比熱 c_{liquid} , 過冷却度 ΔT , 凝固量 x , 凝固熱 H_m として,

$$c_{\text{liquid}} \Delta T = \Delta x H_m$$

と, Δx の凝固量が算出できる。 ΔT がゼロ, すなわち, 融点で温度上昇に転じるのでは凝固量はゼロとなる。

この過冷却現象をモデルとするために, 狐とうさぎのゲーム理論を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} &= K_0 + K_1 n + K_2 f \\ \frac{dn}{dt} &= K_4 f + K_5 n \end{aligned} \quad (11)$$

という式を立てる。 f は凝固質量分率, n は凝固核の密度である。これを解き,

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{K_2 - K_5}{2}, \\ d_2 &= \sqrt{\left(\frac{K_2 - K_5}{2}\right)^2 + K_1 K_4 - K_2 K_5} \end{aligned}$$

として, $d_1 < 0, d_2 < 0$ となる条件では,

$$f = C e^{d_1 t} (\sin d_2 t + \cos d_2 t)$$

という減衰振動となる。この振動は1/2周期で減衰する。このように過冷却現象を表すことができる。

式 (11) では, K_1 は活性化した凝固核からの凝固体の成長速度, K_2 は負値で, 凝固体が生じることで消滅する凝固核数を表し, K_3 はフレーク状の固体の表面を凝固核として凝固とともに増す凝固核生成速度, K_4 は, 凝固核の自然消滅速度を示す。ここでは, $K_2=0$ としている。

式 (11) で, 初期値が重要になる。 $t=0$ のとき, $f=0, n=0$ であるので, 凝固核は生成されないことがあるが, 過冷却度のアレニウス型関数で, 過冷却からの氷の成長速度が定義できる⁴⁾ ので, 式 (12) によって, 生成される。

$$K_0 = C_a \exp\left(-\frac{E}{\Delta T}\right) \quad (12)$$

6. 結果

以上の解析を計算機コードとした。時間積分は, Runge Kutta法を用いて計算した。

図12には, ガラスボトルのパラフィンを空冷した時の温度変化を示す。図中のCalculate線が計算結果であり, fraction of solidはパラフィン A の固化率を表した。4L容器での計算シミュレーションと同時に容器を水平円筒にすることで, 図13に示すように20Lの容器での冷却過程も精度よく模擬することができた。これらから実験を計画している200Lタンクの冷却過程においても, 実験結果と, 計算したものを図14に示した。使用したパラフィンは同じではなく, 融点が異なるため, 低融点成分を40%として計算している。実験値は, 過冷却に

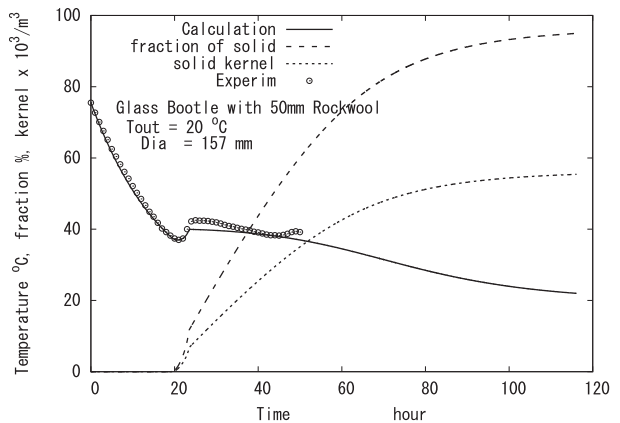


図12 4L ガラス瓶での凝固実験

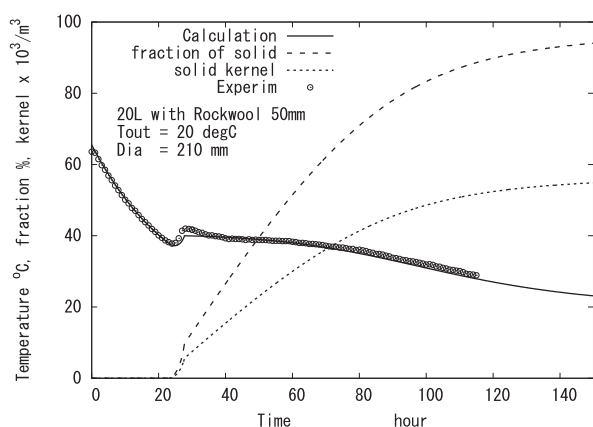


図13 20L水平円筒タンクでの凝固実験

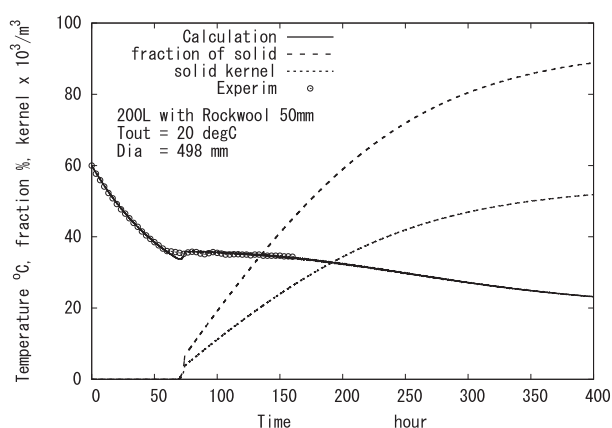


図14 200L水平円筒タンクでの凝固結果

よる温度変化の凹部が計算値ほどではないが、かなり良好な一致をしている。

6.1 ま と め

以上の研究から次のことを明らかにした。

- 1) 保温した容器内のゆっくりした冷却過程では、容器内の温度分布は平坦で準定常仮定で近似できる。
- 2) 保温した容器内のゆっくりした冷却での固化は、最も低温と考えられる壁面ではなく、自然対流の上昇部に堆積する。
- 3) 冷却による温度降下曲線は、液体顕熱冷却過程、過冷却、潜熱冷却、固体冷却という4つの領域に分けられる。
- 4) 過冷却過程は、凝固核密度を媒介変数として記述できた。
- 5) 4つの領域に対応する計算コードを作成し、良好な精度で模擬することができた。

参考文献

- 1) NIST. Nist chemistry webbook. <http://webbook.nist.gov>.
- 2) 岸本健：凝固を考慮したパラフィンの容器内流動解析. 投稿予定, 12, 2017.
- 3) 凝固点降下: <https://ja.wikipedia.org/wiki/凝固点降下>.
- 4) 横山晴彦：過冷却水とその構造. 横浜市立大学論叢自然科学系列, Vol.62, No.1, pp.11-34, 2012.
- 5) 日本機械学会. 伝熱工学資料改訂第5版. 日本機械学会, 2009.
- 6) 阿部豊：伝熱工学講義ノート第7回. <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/abe/>.