

## Effect of Intermittent Electric Field on Freezing Initiation of Supercooled Water in Oil-coated Glass Tube for Latent Heat Thermal Energy Storage

# 油によりコーティングした過冷却蓄熱管内の過冷却水に対する間欠電場の凍結開始効果

Masanori FUJIMOTO Yoshiro TOCHITANI  
藤本 雅則<sup>1</sup> 栗谷 吉郎<sup>2</sup>

### Abstract

An experimental study is carried out to clarify the effect of the intermittent electric field on freezing initiation of supercooled water. As glass test tube, to which inside is coated by silicone oil, is filled with the water and silicone oil, meniscus between water and silicon oil is formed in the tube. The electric field is applied from the outside of the tube by use of wire electrodes, which is set up in parallel to the axis of the tube. The experimental condition is -5°C and 35kV, rectangular wave of 0.1Hz in frequency and 0.5 in duty ratio. As a result, the effective arrangement of the electrode is shown. The coating is, to some degree, effective to keep supercooling state of water steady. The electric field causes movement of the intersection of the meniscus and the inside of the tube. Application of the intermittent electric field is effective to freezing initiation of the supercooled water, even if the oil coating exists inside of the glass tube. Relative frequency of freezing initiation obtained is 0.94.

**Keywords:** Latent heat thermal energy storage, Supercooling, Freezing, Water, Electric Field.

**キーワード :** 潜熱蓄熱, 過冷却蓄熱, 過冷却, 凍結, 水, 電場.

### 1. はじめに

過冷却現象を見かけの蓄熱状態として利用する研究が行われている<sup>1)3)</sup>. 物質がもつ特性を巧みに利用して、環境温度よりも高い温度を得る方法であり、寒冷地における冷気の利用等に結びつく可能性があることから、資源的にもエネルギー的にも期待できる方法である。得られる温度差は小さく、比較的低温での利用に限られるものの、大量の熱量を確保できることから、研究の進展が期待される。

その実用化には、二つの大きい技術的課題がある。一つは、蓄熱液の過冷却状態を安定に維持する技術であり、他の一つは採熱時に過冷却状態を解消する確実性の高い技術である。

著者らは後者の技術として、電場を付与する方法が最適と考えて研究を進めてきた。過冷却解消技術の困難さは、解消時以外、過冷却状態を安定に保たなければならない点にある。著者らは、過冷却状態の不安定化要因となる機器等を蓄熱液中に入れる必要のない方法を検討した結果、電場を用いる方法に着目した<sup>4)</sup>。電場は蓄熱管の外側から付与することが可能であり、従って過冷却状態の蓄熱液中に解消用機器等を入れる必要がなく、これによる自発的な過冷却解消の可能性がないと考えたことによる。

以下、その概要について述べるが、本研究はまだその緒に就いたばかりであり、蓄熱液には便宜的に水を用いている。したがって、本研究の結果には水固有の特性が含まれる可能性がある点をご了承いただきたい。なお、他の蓄熱液に対する効果、適用可能性等については、今後研究を進める予定であり、核生成技術としてはより高温の太陽熱蓄熱等への利用可能性を持つと考えている。

既報<sup>4)</sup>の概略は次のとおりである。蓄熱管を模したガラス管中に、蓄熱液として水、封止液としてシリコーン油を入れると、ガラス-水-油による三相境界が形成される。管の外側から電場を付

\*1 金沢工業大学 基礎教育部 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1)

e-mail: fujimoto-m@neptune.kanazawa-it.ac.jp

\*2 金沢工業大学 教育支援機構  
(原稿受付: 2017年1月30日, 受理日: 2017年5月10日)

与すると三相境界が運動し、温度条件等が満たされていれば、この運動が引き金となって過冷却水は凍結を開始する<sup>4),5)</sup>。既報では、その有効性と、全サンプルが凍結を開始する印加電圧等を報告した。しかしながらこの系では、過冷却水とガラス面が直接接触しているため、過冷度がさらに大きい条件では、この部分で自発的核生成を起こす可能性が高く、安定性を長時間維持するためには、何らかの解決策が求められる。

ところで、過冷却状態は熱力学的には準安定状態であって、長時間維持することは一般に容易ではない。しかし、従来の研究によれば、油中の水滴のように、液液界面で保持された過冷却水は自発的解消を起こし難いことが知られており、例えば Bigg<sup>6)</sup> は液液界面に水滴を保持して、過冷却限界の実験を行っている。また、冷熱蓄熱液としての利用が検討されている W/O エマルション<sup>8)</sup> は、自発的凍結核生成の確率が低いと考えられるが、その理由は水滴の体積、表面積ともに極めて小さいことに加えて、水が油以外の物質と接触していないことにあると考えられる。過冷却蓄熱で想定される蓄熱液の体積は大きく、もとよりエマルションの比ではないが、蓄熱液と固体面との接觸を断つという考え方では、自発的核生成確率を低減する効果を持つことが期待できるであろう。以上のことから、蓄熱液を、それと不溶もしくは難溶の油等で保持する技術は検討に値すると考えられる。

しかしながら、過冷却状態の長時間安定維持と、高確率の過冷却状態解消はトレードオフの関係にあると考えられる。液液界面で保持された水が過冷却状態を維持しやすいとすれば、既報で述べた電場による核生成法の有効性は低下する可能性がある。したがって、液液界面で保持した蓄熱液に対する既報の核生成方法の有効性を、実験的に確認、検討する必要があると考える。

一方、電場を付与する実験研究では、電極として平板が使用されることが多い、例えば Pruppacher<sup>5)</sup>、栩谷ら<sup>4)</sup> も、平板電極で過冷却水の入った円管を挟むようにして電場を付与している。しかしながら、管内の三相境界を運動させる目的の電場では、蓄熱管内の液体に局所的に電場を付与できればよく、熱容量の大きい平板電極に代えて金属細線を電極として使用する利点は多い。以後、金属細線による電極を線電極と呼ぶことにする。

線電極を採用すると、例えば、実験上は、①電極近傍の三相境界の運動挙動の観察が容易になる。一方、実機においては、②電極面積の減少による漏れ電流低減の可能性があることから、電力の利用効率の向上と、熱媒自体のジュール加熱抑制による採熱量の増加に結びつくこと、③複数蓄熱管を制御する場合、板電極に比べて蓄熱管配置の自由度が高いこと、④電極を介した既核生成管からの熱伝導による加熱を回避できること、⑤蓄熱管の冷却、採熱時に蓄熱管の周りを流れる熱媒の流路抵抗が平板電極に比べて小さいこと、⑥系の熱容量が小さくなること等がある。一方、平板電極には、蓄熱管の支持機構との一体化が可能であることなどの利点がある。

本研究で扱っている現象、すなわち電場による界面等の

運動挙動は、電場の付与による濡れ性の変化に起因すると考えられる。これは Electrowetting と呼ばれる現象と考えられ、水滴の凍結に対するその効果について基礎研究<sup>7)</sup>も行われている。本報では、凍結核生成効果の応用に着目しており、濡れ性の変化等の検討は行っていない。

既報に対する本報の改善点等は次のとおりである。既報の蓄熱管はガラス管であり、蓄熱液として用いた過冷却水を直接封入していた。固体面に触れる過冷却水は凍結を起こしやすく、過冷却状態の長時間維持に難があると考えられた。本報では、この点を改善すべく、ガラス管内面にシリコーン油コーティングを施して、過冷却水とガラス面が直接触れないようにして、過冷却状態の安定維持を図った。次に、電場付与用電極を既報の平板電極から金属細線に替え、その最適設置位置を実験的に検討した上で使用した。この結果、電極近傍の視野が広くなり、界面の挙動や凍結開始が観察しやすくなった。

本報の目的は、既報の蓄熱管に比べて過冷却状態を維持しやすい蓄熱管を用いて、その中の過冷却水の凍結開始に対する電場の効果を実験的に検討、検証することである。本研究の蓄熱管の内面にはシリコーン油コーティングが施してあり、電場は蓄熱管の外側から金属細線電極によって間欠的に付与している。本報告では、過冷却水の運動挙動および凍結開始に与える影響、効果に焦点をあてて実験的に解明、検討している。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

Fig.1(a), (b) は実験装置の概要を示している。図(a)のように、装置主要部は大きく分けて試験部、冷却系、電場付与系からなり、他に記載を省略した撮影系がある。

試験部は、模擬蓄熱管とそれを冷却する試験槽からなり、熱媒はシリコーン油である。試験槽はガラス製ビーカーで、エチレングリコール水溶液を満たした冷却槽中に保持して冷却される。

Fig.1(b) は試験部の上面図である。模擬蓄熱管には、内径 27mm、外径 30mm のパイレックスガラス製試験管 3 本を用いた。蓄熱管は鉛直に設置し、それぞれの中に、後述の蓄熱液と封止液が入っている。電場付与用の線電極には、Φ 0.3mm、有効長さ 40mm のコンスタンタン線 2 本を用い、それらは各蓄熱管の外面に、管軸に平行に、管を挟んで互いに向かい合うように取り付けた。その軸方向位置は、Fig.2 に示すように、電場の付与対象が (a) 封止液のみ、(b) 封止液と蓄熱液の両方、(c) 蓄熱液のみ の 3 種類として、最適位置を実験的に決定した。

冷却槽は透明アクリル板製であり、その外周は断熱材で覆い、撮影時は一部を取り外して内部の現象を撮影した。冷却槽の温度は、投げ込み式クーラー（タイテック、COOLPIPE 400R）と、JIS T 型熱電対（Φ 0.3mm）、デジタル指示調節計（横河電機、UT40）、ソリッドステートリレー（オムロン、G3NA-220B）、電気ヒーター（八光電機、1kW）によって制御した。

電場用電源には直流安定化高電圧電源（マクセラック、AMS-40K01P）を用い、負側を接地した。現象はデジタルカメラ（CASIO、EX-F1 又は JVC、GC-PX 1）により 60fps で撮影した。照明には

メタルハライドファイバ照明装置（シグマ光機、IMH-250）による透過光を採用し、試験管3本と各々の線電極が視野に入る方向から撮影した。

## 2.2 蓄熱管の準備

蓄熱管および蓄熱液等の準備段階では、過冷却状態を不安定化する要因を極力取り除くように細心の注意を払った。

蓄熱管の洗浄は、実験器具洗浄剤（柴田科学、シバタクリーンA）の5%水溶液による24時間以上の浸漬洗浄、水道水でのすすぎ、市販の台所用中性洗剤による洗浄、水道水によるすすぎ洗い、蒸留水、エタノール、後述の二回蒸留水によるすすぎ、自然乾燥の順で行った。その後、室温で蓄熱管にシリコーン油を満たし、約10分間静置後、試験管を倒立させて一定時間おいてシリコーン油を流下させ、内面にシリコーン油膜を形成した。その後静かに、後述の二回蒸留水を注入し、その上にピペットによりシリコーン油を静かに満たして液液界面を形成した。この方法により、水をシリコーン油のみに接する状態に保ち、他の凍結核生成の原因となる諸条件を可能な限り回避した。油膜形成前後の蓄熱管質量と油膜付着面積から求めた平均油膜厚さは、約50μmである。

## 2.3 試料液と実験方法

蓄熱液には二回蒸留水を、封止液にはシリコーン油（信越シリコーン、KF96-5CS）を用い、それぞれ約25mlとした。液深は前者が $h_0=50\text{mm}$ 、後者が $h_w=50\text{mm}$ である。蓄熱管内面の油膜にも同じシリコーン油を用いた。蒸留水はイオン交換器（オルガノ、SHD1-SA）でイオン交換した水をガラス製蒸留器で蒸留した水であり、二回蒸留水は蒸留水を再度ガラス製蒸留器で蒸留した水である。シリコーン油は、実験の度に保留粒子径5μmの濾紙（アドバンテック、No.2）でろ過した後に使用した。

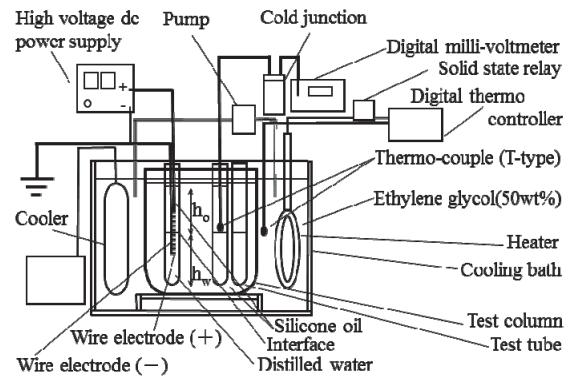
過冷却水の温度は、蓄熱管内の油水界面直上の封止用シリコーン油中に設けた熱電対の値で代え、電場付与時は熱電対を退避させた。印加電圧 $U$ は35kVとした。電場付与による界面挙動の観察実験は常温で行い、凍結実験は $-5\pm0.2^\circ\text{C}$ で行った。また、蓄熱管の内面コーティングの過冷却状態維持効果の実験は、装置の冷却限界である $-10^\circ\text{C}$ で行った。

電場付与実験は、系が定常状態に到達後しばらく時間をおいて開始した。電場は、高電圧電源の電源スイッチを手動で、5s間隔で断続することによって、周期約10s（周波数0.1Hz）の疑似方形波を付与し、20周期まで繰り返した。本報告中の時間 $\tau$ は電場付与開始時、すなわち一回目の電場付与時を基準0sとした経過時間を示しており、 $\tau$ と電場付与、遮断の関係は、 $i=0\sim19$ として、付与時間は $10i\sim10i+5\text{s}$ 、遮断時間は $10i+5\sim10i+10\text{s}$ である。 $\tau$ は当該コマとの対応を明確にするために、小数点以下二桁まで示している。

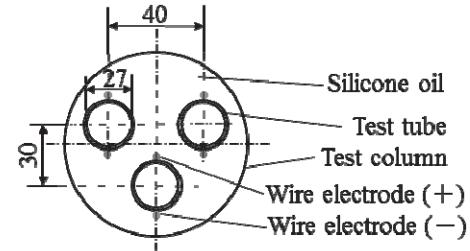
## 3. 結果と検討

### 3.1 油膜コーティングの過冷却状態維持効果

過冷却状態の維持に対するシリコーン油膜コーティングの有効性を確認するために、装置の到達最低温度である $-10^\circ\text{C}$ まで冷却、保持して、後述の境界、界面の様子をデジタルカメラで撮影して、詳細に観察した。また、これとは別に、既報と同じ条件、



(a)Front view



(b)Top view of test section

Fig. 1 Experimental apparatus.

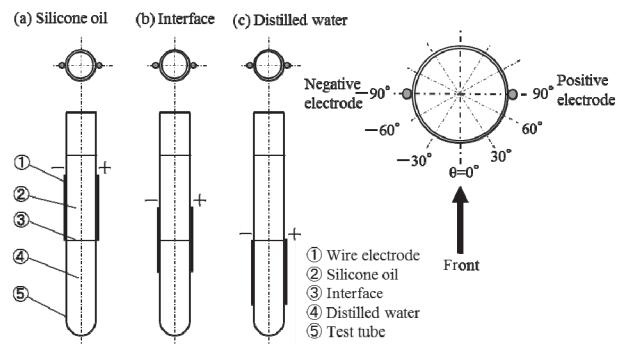
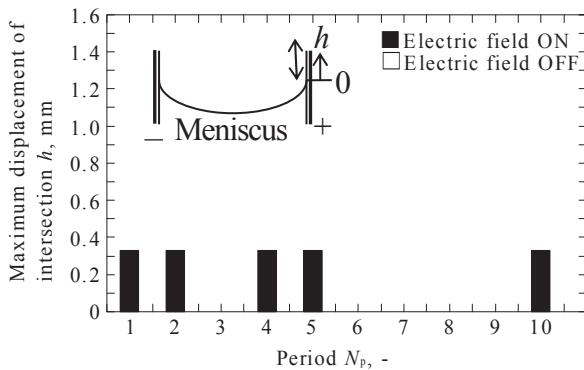


Fig. 2 Position of wire electrodes.

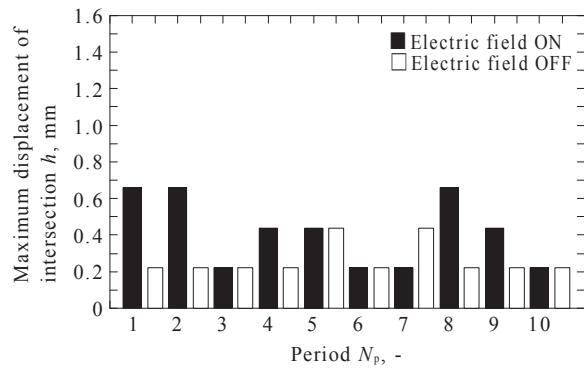
すなわちガラス管内面の油膜コーティングがない条件下において同様の維持実験を行った。その結果、油膜がない条件下では、振動等の凍結核生成促進因子を極力排除しているにも拘らず、サンプル6本中6本が冷却途中の $-8\pm0.5^\circ\text{C}$ で相次いで凍結し、 $-10^\circ\text{C}$ に到達できたサンプルはなかった。一方、コーティングを施したガラス管の場合には、サンプル6本中6本が $-10^\circ\text{C}$ で約10時間以上過冷却状態を維持することができた。このことから、油膜コーティングはある程度の過冷却状態を安定に維持する効果をもつと考えられる。

### 3.2 電極位置が液液界面の挙動に与える影響

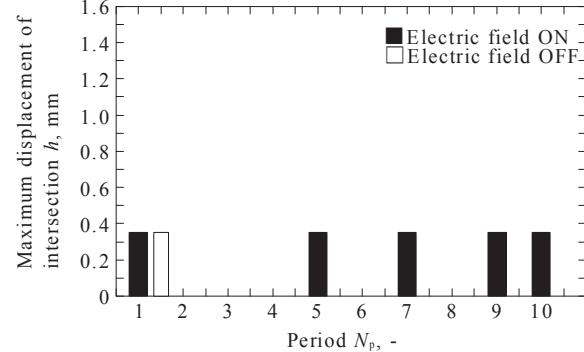
電場付与前のメニスカスは、後述のFig.4(1)に見られるように、下に凸であり、ガラス管内面近傍で持ち上げられた形状であって、その形状はFig.2の角度 $\theta$ によらない。ガラス管内面の油膜コー



(a) In case of electrode position (a) in fig.2.



(b) In case of electrode position (b) in fig.2.



(c) In case of electrode position (c) in fig.2.

Fig.3 Relationship between maximum displacement of the intersection and periods.

ティングにより水とガラスは直接触れていないために、既報<sup>4)</sup>のようなガラス-油-水による三相境界は存在しない。以後、三相境界の用語に代えて、封止液と水による下に凸のメニスカスがガラス管内部の油膜と交わる線を境界と呼び、他の部分は界面と表現する。

油膜コーティングがない場合、電場付与は電極近傍の三相境界の上昇、揺動を起こすことが確認されている<sup>4)</sup>。しかしながら、油膜コーティングを施した場合における電場付与の効果、およびFig.2に示した電極位置の影響については明らかでない。はじめに、これらの点に関する実験を常温で行った。

Fig.3(a), (b), (c)は、正負両電極を含む面内の、電場付与による境界変位の最大値  $h$  の一例を示しており、それぞれ Fig.2 の電

極位置(a), (b), (c)に対応している。最大値は正電極または負電極近傍のどちらかで起こるが、図では極性は区別していない。黒塗りの棒グラフは電場付与期間、白抜きのそれは電場遮断期間の  $h$  であり、電場の付与方法は実験方法で述べた通りであり、それぞれ 10 周期までの結果を示している。

Fig.3 によれば、図(b)の  $h$  が最大であり、電場付与時の  $h$  の平均は 0.43mm 程度である。(b)では、電場遮断時にも  $h > 0$  が確認できるが、(a), (c)にはほとんど見られない。この変位は、固液界面における誘導電荷に起因すると考えられるが、現時点ではそのメカニズムの詳細は明らかではない。なお、Fig.3 の  $h$  の値 자체は、過冷却状態での値と異なる可能性があるが、これまでの経験から、界面変動の傾向に差はないと考える。既報の観察結果によれば、 $h$  の大きさと凍結開始の間には相関がないか、あるとしても弱いという結果が得られているが、変位の発生は凍結核生成の絶対条件であるとしている。したがって、確実に界面が変動する電極位置としては Fig.3(b)が最適と判断できる。以上のことから、以後の実験では、電極は Fig.2(b)の位置、すなわち電場がシリコーン油と二回蒸留水の界面付近を中心として両液に付与できる位置を採用した。

### 3.3 凍結開始前の界面と境界に対する電場付与の影響

Pruppacher<sup>5)</sup>は、プラスティック管内の三相境界は電場によって運動し、凍結を開始したと述べている。本研究の蓄熱管内部の濡れ性はガラスよりもプラスティックに近く、三相境界の運動は境界のそれに代わるとも考えられる。しかし、管の内径や材質、シリコーン油の物性等を含めて考えると、電場を付与する系は Pruppacher の系とは異なると考えられ、境界に対する電場の効果は必ずしも明らかではない。以後、境界の詳細観察結果について述べる。

Fig.4 は、二本の線電極を含む面における境界の基準位置からの高さ  $h$  の一例を示しており、画像解析によって得た値である。横軸には Fig.2 に示した中心角  $\theta$  をとっている。各プロットは  $h$  の時間変化の一例を示しており、破線は電場付与前の界面の高さ、すなわち基準値を示している。電場付与の繰り返しによって周期的に変動するが、その値に再現性がある現象ではなく、むしろ変動を繰り返すことが後述の核生成に有効であると考えられる。図では、正極で最大値が得られており、 $h$  は基準位置に比べて約 0.2mm 上昇している。既報とは、内径等の条件が異なるので単純に比較はできないが、三相境界の変化に比して境界のそれは小さい傾向があり、水が液液界面で覆われているという本研究の条件に起因するものと思われる。前述のように界面の応答遅延後に界面は最高点に達し、併せて線電極周辺の界面にはさざ波の発生が見られる。この境界の変位、変動が発核促進効果をもつ可能性が高いと考えられる。

現時点では、凍結核生成の支配因子は明らかでないが、一つの因子として境界の移動速度が考えられる。その一例を示すと、画像解析で得た境界の試験管内部に沿う鉛直上向き方向の平均速度は約 8.7mm/s であった。

なお、Fig.2 の  $\theta$  方向に対する境界の変位は、電極近傍、すなわち  $\theta = \pm 90^\circ$  で最大であり、 $\theta$  が  $0^\circ$  または  $\pm 180^\circ$  に近づくにつれて小さくなる。 $\theta = 0^\circ$ ,  $\pm 180^\circ$  では正極および負極からの

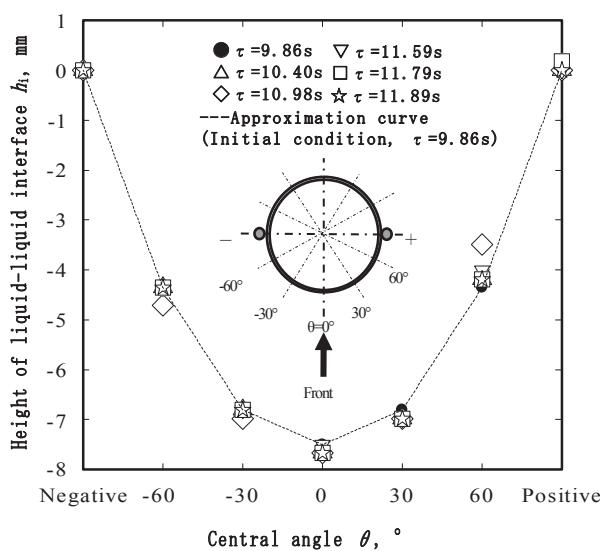


Fig.4 Height of interface and intersection vs. central angle.

変位が干渉することもあるが、変位自体は微小である。なお、今回の実験では電極近傍を除く領域における凍結開始は確認できていない。

以上、述べたように、内面に油膜コーティングを施した管内に形成される境界は、線電極を用いた電場付与によって不安定化し、変位、揺動の見られることが明らかになった。

### 3.4 電場付与による界面の挙動と凍結開始現象

Fig.5 は、二回目の電場付与後に凍結を開始した場合の撮影例であり、凍結開始前の界面及び境界近傍の挙動と凍結開始の様子を、写真とスケッチで示している。写真、スケッチとともに、左側に負電極、右側に正電極がある。時間  $\tau$  は電場付与開始時点を  $\tau=0$  sとした時間であり、図(1)から(4)に進んでいるが、特徴的な現象のコマを取り上げているために、コマ間の時間は同じではない。以下に、界面の挙動と凍結開始の様子について詳細に述べる。なお、図中の矢印は凍結の進行方向を示している。

Fig.5 は  $\tau=11.89s$  から始まっているが、この前の  $\tau=10.00s$  で二回目の電場を付与しており、写真は省略するが、その後の現象は次のように変化している。 $\tau=10.40s$  で電極近傍の境界が僅かながら揺れ出す現象が確認できており、境界の変動は  $\tau=11.59s$  まで続いた。境界の変位は電極近傍で大きく、それから離れるにしたがって小さくなる。また、 $\tau=11.79s$  には、電極近傍の境界が局所的に上下方向の速い振動を複数回繰り返し、この時間前後に境界の高さが最高点に達した。このような不安定状態は  $\tau=11.46s$  まで継続した後、電極近傍の境界付近から凍結核生成が確認できた。なお、界面変位には極性による差がみられ、正極側が大、負極側が小の傾向があった。この差は後述の核生成の発生割合と関係する可能性があるものの、今回は詳細に検討するには至っていない。また、電場遮断後にも上述の現象が見られ、電場遮断後は応答遅れの後、境界が動き始め、激しい境界の揺動状態があり、その後境界の揺動が落ち着いて電場付与前に戻るという過程を経た。境界は、電場付与開始、遮断の両方でこのような挙動を示しており、この挙動が過冷却水の凍結核生成を促すと考え

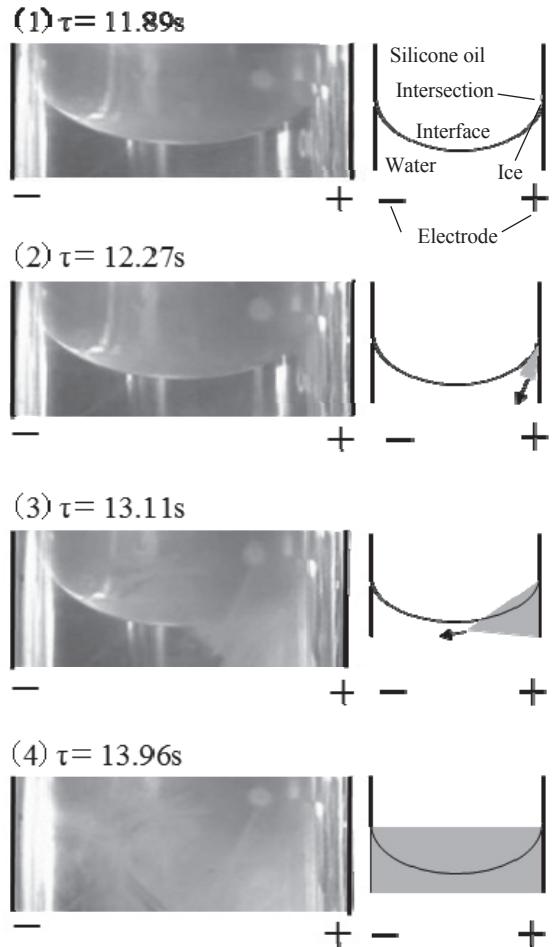


Fig.5 Behavior of intersection and freezing initiation of supercooled water under intermittent electric field.

られる。

Fig.5(1)は  $\tau=11.89s$  であり、凍結核生成が起こったと判断できた画像である。この判断は次の手順によった。すなわち、明らかに凍結開始を確認できるコマ、例えば Fig.5(2)から  $\tau$  を遡ってコマの画像を確認し、凍結を確認できた最小の  $\tau$  のコマを選んだ。 $\tau=11.89s$  の後、まだ微小ではあるが氷結晶の広がりが見られ、凍結の進展が確認でき、その後  $\tau=12.10s$  から  $\tau=13.39s$  にかけて凍結が下方へ進展し、その範囲が確実に拡大する。つまり、右側の電極近傍の境界付近で発生した凍結は、急速に下方へ進展している。(2)では、スケッチの灰色に塗った領域が凍結の進展範囲であり、写真では白く見え始める。(3)では、その範囲が広がって下に凸の界面が見えなくなり、以後この見えない範囲が増加している。凍結が管内面の手前の境界を進むことによって、界面が覆い隠されるためである。(4) $\tau=13.96s$  では、図中左方向に進んだ凍結が左端に到達し、左側面から下方に向かう進展が観察され、凍結が見かけ上完了し、ガラス管内全体に凍結が及んだ様子である。この例では、核生成は正電極側で生じているが、負極側で生じる場合もある。この例における核生成位置は、正電極付近の境界であった。

以上の観察結果から、凍結核生成は境界の運動が引き金になっていると考えられ、既報<sup>4)</sup>、Pruppacher<sup>5)</sup>と同様である。しかし、

3.3 で述べたように、核生成の要因は境界の変位の大きさではなく、移動速度や水とコーティングの接触面積の変化等の影響を受けているように見える。また、凍結核生成は、電場遮断中にも発生することが確認できていることから、残留電荷等の変化によると思われる僅かな界面の移動によるものもあると思われる。

### 3.5 断続電場付与の凍結開始効果

前節で述べたように、電場の遮断によって $-5^{\circ}\text{C}$ の過冷却水の凍結開始を確認できた。ここで、累積凍結度数  $P$  を次式で定義する。

$$P = N_f / N$$

ここに、 $N_f$  は凍結を開始したサンプル数、 $N$  は総サンプル数であり、凍結開始サンプル数は電場付与時、遮断時の凍結数の合計をとっている。

Fig.6 は、 $P$  と  $N_f$  の変化を  $\tau$  に対して示している。サンプル数が十分でないことによると思われるばらつきが見られるものの、全体的に見て比較的短時間で凍結核生成を起こすサンプルが多く、その結果  $\tau$  の増加に従って  $N_f$  の減少傾向があることを示している。 $\tau \leq 100\text{s}$  では  $33$  サンプルが核生成を起こし、 $P=0.91$  である。 $\tau \leq 50\text{s}$  の累計は  $N_f=26$  となっており、 $P=0.72$  である。この時間内に凍結を開始するサンプルは、全体の約  $3/4$  であることから、凍結核生成に対する電場付与の効果は高いことを示している。凍結実験の結果、 $N = 36$  に対して  $N_f = 34$  であり、 $P = 0.94$  となった。この結果は、凍結核生成を抑制すると考えられる油膜コーティングが管内面に存在する条件下であっても、線電極による電場付与は、核生成の促進効果をもつことを示している。

なお、本報告では  $P=1.0$  となる印加電圧を示していない。既報<sup>4)</sup>で示したように、 $P \approx 1$  であれば、印加電圧の増加によって、容易に  $P=1$  となる電圧を見つけることができること、またこの電圧は、蓄熱管の直径等の条件によって変化する値であること等による。したがって、実用化の際は、使用条件に合わせた値を決定する必要がある。

本研究では、線電極を用いており、既報<sup>4)</sup>の平板電極とは異なることは先に述べた。消費電力の概略値を求めるために、電場付与時の定常電流を測定した。蓄熱温度への影響を知るために、温度  $t$  に対する変化を求めていた。Fig.7 は  $t$  に対する油中を流れる電流  $I$  と消費電力  $P_o$  の関係を示している。平板電極を用いた既報の消費電力は、 $-5^{\circ}\text{C}$  で蓄熱管 1 本あたり約  $1.5\text{W}$  であったのに対して、本研究のそれは約  $0.97\text{W}$  となった。電極形状、蓄熱管直径、したがって電極間距離等が異なる他、油中の水分量が異なる可能性もあるので、単純に比較することは困難であるが、いずれの場合も過冷却の解消操作の時間、すなわち電場付与時間がたかだか数分間程度であることを考慮すると、実用上問題ないレベルの消費電力と考えられる。

## 4. まとめ

内面にシリコーン油コーティングを施したパイレックスガラス製試験管中に、蒸留水とシリコーン油を入れて模擬蓄熱管とし、管外に設けた金属細線電極に  $35\text{kV}$  の電圧を間欠的に印加するこ

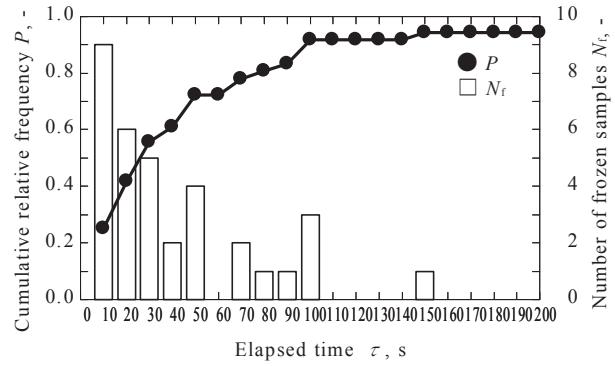


Fig.6 Relation between number of frozen samples, relative frequency and elapsed time under intermittent electric field.

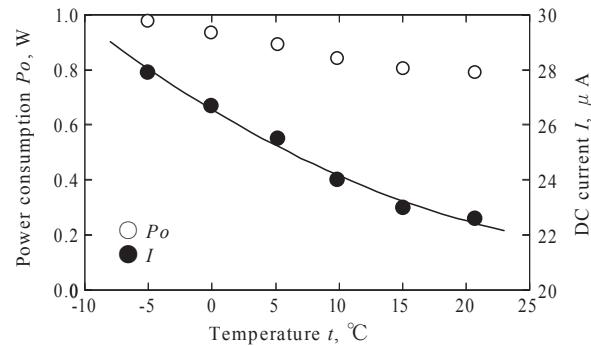


Fig.7 Relationship between dc current and temperature.

とによって管内の過冷却水に断続電場を付与する実験を行い、コーティングによる過冷却状態の安定化効果と、断続電場の過冷却解消効果を実験的に検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 模擬蓄熱管内面にシリコーン油コーティングを施した場合は、 $-10^{\circ}\text{C}$ で 10 時間以上過冷却状態を維持することができた。油膜コーティングはある程度の過冷却安定化効果をもつと考えられる。
- 2) 電場の付与対象を封止液のみ、封止液と蓄熱液の両方、蓄熱液のみの 3 種類として凍結核生成のきっかけとなる境界の運動を調べた結果、最も大きい変位が見られたのは封止液と蓄熱液の両方に付与した場合であり、この位置が電極の最適位置と判断できた。
- 3) シリコーン油でコーティングされた模擬蓄熱管に電場を付与すると、管内の境界に変位や揺動が生じ、不安定化することが確認できた。電場の付与もしくは遮断直後は、界面の挙動に応答遅れが見られ、その後、境界が動き始め、揺動が激しくなった後、揺動が落ち着き、電場付与もしくは遮断前の状態に戻るという過程を繰り返すことが確認できた。
- 4) 線電極による断続電場の付与は、管内面に凍結開始を妨げる効果を持つ油膜コーティングが存在する条件下であっても、管内の過冷却水の過冷却解消に一定の効果を持つことが確認できた。凍結核生成は、電場付与による境界の運動が引き金になっていると考えられ、解消は電場付与中のみでなく、電

- 場遮断中にも見られた。累積凍結度数は0.94であった。
- 5) 線電極を用いた模擬試験管に対する電場付与時の消費電力は0.97W程度であった。

## 参考文献

- 1) 平野聰, 斎藤武雄, 過冷却蓄熱装置の動作特性, 太陽／風力エネルギー講演論文集, (2002), pp.325-327.
- 2) 平野聰, 斎藤武雄, 過冷却蓄熱装置の熱特性, 太陽／風力エネルギー講演論文集, (2003), pp.297-300.
- 3) 平野聰, 斎藤武雄, 過冷却蓄熱を利用した太陽床暖房システムの動作, 太陽／風力エネルギー講演論文集, (2004), pp.277-280.
- 4) 柳谷吉郎, 高野仁志, 藤本雅則, 過冷却蓄熱管の外側から付与した断続電場による管内の過冷却水の凍結開始, 太陽エネルギー, Vol.42, No.1 (2015), pp.69-75.
- 5) Pruppacher, H.R., The effect of an External Electric Field on the Supercooling of Water Drops, Journal of Geophysical Research, 68(15), (1963), pp.4463-4474.
- 6) E.K.Bigg, The Supercooling of Water, proceedings of the Physical Society, Section B66 (1953), pp.688-694.
- 7) K. Carpenter, V. Bahadur, Electrofreezing of water droplets under electrowetting fields, Langmuir, 31(2015), pp.2243-2248.
- 8) 松本浩二, 及川 健, 岡田昌志, 寺岡喜和, 川越哲男, 氷蓄熱を対象としたエマルションによる高機能氷スラリーの生成に関する研究(蓄熱材としてのエマルションの適応性の検討) 日本冷凍空調学会論文集, Vol.22, No.3 (2005), 237-247.