ポリ塩化ビニル製過冷却蓄熱管内の 過冷却水の凍結開始に対する電場の効果

Masanori FUJIMOTO 藤本 雅則^{*1‡} Yoshiro TOCHITANI 栩谷 吉郎^{*2}

Abstract

An experimental study is carried out to clarify the effect of the electric field on freezing initiation of supercooled water in a soft PVC (polyvinyl chloride) tube. It is selected for the reason that the hydrophobe of PVC is thought to maintain the supercooled state of water easily, in condition that the electric field is not applied. As water and silicone oil is filled in the tube, a triple-phase boundary is formed inside the tube. The electric field is applied from the outside of the tube by use of a pair of wire electrodes, which is set up in parallel to the axis of the tube. The experimental condition is -5°C in temperature and 35kV DC in voltage. As a result, the PVC tube is, to some degree, effective to keep supercooled state of water steady. The electric field is effective to initiate freezing of supercooled water, even if the water is filled in PVC tube of low wettability to water. Relative frequency of freezing initiation obtained is 1.0, and all samples began freezing within 10 seconds after the electric field had been applied.

Keywords: Thermal energy storage, Supercooling, Ice formation, Freezing, Water, Electric Field キーワード: 過冷却蓄熱, 過冷却, 氷生成, 凍結, 水, 電場

1. はじめに

液体が過冷却状態を解消する際に生じる温度上昇を 環境温度に対する見かけの蓄熱状態とみなして,利用す る研究が行われている¹⁾⁻³⁾. エネルギーを使わずに,物質 の性質を巧みに利用して,環境温度よりも高い温度を得 る技術であって,冷気の有効利用等に結びつく可能性が あることから,寒冷地等での応用が期待される. 過冷度に 見合う分だけの温度上昇であるから,温度差は大きくない. しかし,量的には,大熱量の確保につながる可能性があり, さらなる研究の進展が望まれる. この技術を実用化する上で,解決すべき二つの大きい 課題がある.蓄熱液の過冷却状態を長時間安定に保つ 技術と,採熱時に使用する確実性の高い過冷却解消技 術である.加えて,将来的には,小温度差伝熱技術との 組合せが必要になることも予想される.

著者らは, 過冷却解消技術として, 電場を用いる方法 を提案し, 研究してきた^{4),5)}. この技術には, 解消時を除 いて, 自発的な過冷却解消を極力回避することが求めら れる. 例えば, 過冷却状態の蓄熱液は, 容器内面以外の 物体と接触しないことが望ましい. 電場は蓄熱管の外側 から付与可能であり, 蓄熱液中に一切の機器を入れる必 要がなく, この条件を満たす.

著者らが検討している電場付与による過冷却状態解 消法の概略は次のとおりである,詳細については既報^{4),5)} を参照願いたい.以下,蓄熱液として水,封止液としてシ リコーン油を用いる場合で説明する.蓄熱管内に両液を

^{*1} 金沢工業大学 工学部 (〒924-0838 石川県白山市八束穂 3-1) ‡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11月7日,受理日:2018年1月23日)

また二液間には液液界面が形成される.この三相境界は, 管外からの電場付与によって揺動し,これが引き金となっ て過冷却水が凍結を開始するとされる⁴⁾⁻⁶⁾.

著者らは、既報 ⁴)において、凍結開始に対する電場付 与の有効性、とくに電場を断続することの有効性、全サン プルが凍結を開始する印加電圧等を報告した.また、既 報 ⁵)では、より安定に過冷却状態を維持できるとされる方 法、すなわち過冷却水を油で取り囲む方法を採用し、こ の場合にも電場付与が過冷却解消に有効であることを報 告した.その過冷却状態の維持時間は、25ml の過冷却 水に対して、一10℃で10時間以上であった.電場付与に よる凍結核生成法では、電場付与後、凍結開始までに時 間遅れが認められ、この場合は最長約 3 分であった.同 一条件ではないが、既報⁴⁾の最長約8分強に比べて改善 が見られた.しかし、いずれの時間も短いとはいえず、実 用上の観点から、応答特性の改善が必要であろう.

ところで,固体表面の疎水性が,それに接する水滴の 凍結開始を遅らせるとの報告がある⁷⁾⁻⁹⁾.著者らの既報⁵⁾ では,前述のように,内面を油でコーティングした容器内 で水の過冷却状態を維持しており,上記報告の内容と矛 盾しない.これらは,水に濡れ難い材質の容器中では,過 冷却状態を安定に維持できる可能性が高いことを示唆し ている.一方で,過冷却状態の安定維持と高確率の過冷 却状態解消とはトレードオフの関係にあると考えられ,疎 水性容器中では,電場付与の凍結核生成効果が見られ ないか,あるいは弱くなる可能性を否定できない.したがっ て,疎水性容器中の過冷却水に対する電場付与の凍結 核生成効果を,実験的に確認,検討しておく必要がある と考える.

以上の検討の結果, 既報で用いた模擬蓄熱管, すなわち ガラス管 ⁴⁾または内面をシリコーン油でコーティングしたガラス 管 ⁵⁾に代えて,本報告では軟質ポリ塩化ビニル管(以後, PVC 管と略記する)を採用した.後述のように,電場を断 続的付与 ^{4),5)}から連続的付与に変更したことを除いて, 他の条件は既報 ⁵⁾と同じとした.なお,自然界における冷 却速度は通常あまり速くないので,熱伝導率の低い PVC でも実用性はあると判断した.耐久性などについては今 後,別途検討の必要がある.

PVC 管で電場付与の予備実験を行ったところ,従来と は異なり,液液界面の揺動は明らかに大きく,周期は比 較的短いように感じられた.このことは既報で用いた電場 の断続操作が不要になることを示唆しているので,電場は 連続的に付与することにした.電場による凍結核生成で は,三相境界の揺動,変位の大小の影響は見られないと の観察結果 4)はあるが,揺動周期に関する報告はこれま で見られないようであり,その効果に関する知見が得られ る可能性もある. 本報告の目的は,疎水性材料による蓄熱管内の水に, 管外から連続的に電場を付与して,電場が三相境界や 液液界面の運動挙動および凍結開始に与える影響,効 果の一端を,常温および過冷却状態で実験的に検討し, 疎水性内面を持つ蓄熱管内の過冷却水の凍結核生成 に対する電場適用の有効性,可能性を検討,実証するこ とである.

2. 実験

2.1 実験装置

Fig.1 は実験装置の概略を示している. 同図(a)は装置 主要部で, 試験部, 冷却系, 電場付与系からなり, 他に 撮影系がある.

試験部は, 模擬蓄熱管とそれを所定の温度に冷却す る試験槽からなり, 試験槽内の熱媒にはシリコーン油を用 いた. 試験槽はガラス製ビーカーで, 冷却槽中の熱媒で あるエチレングリコール水溶液中に保持されている.

Fig.1(b)は試験部の上面図である. 模擬蓄熱管は1回の実験について3本使用し,それぞれ内径26mm,外径30mmの軟質ポリ塩化ビニル管の下端をシリコーン栓で封止したものである. 蓄熱管は鉛直に保持し,それぞれに後述の蓄熱液と封止液を入れた.

電極は、 φ 0.3 mm, 有効長さ 40mm のコンスタンタン線 2 本であり, 管軸に平行かつ液液界面が電極のほぼ中心 に来る位置の各管外面に, 管を挟んで互いに向かいあう ように取り付けた. 負極は試験槽に近い側の電極とした.

冷却槽は透明アクリル板製で,その周囲は断熱材で覆 い,撮影時に一部を取り外して内部の現象を撮影した.





(b)Top view of test section Fig .1 Experimental apparatus. 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(φ0.3mm),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) により制御した.電場用電源には直流安定化高電圧電 源(マクセレック,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)の連写機能を使用して 60fps で撮影した.照明はメタ ルハライドファイバー照明装置(シグマ光機,IMH-250)に よる透過光で行い,原則としてPVC 管3本および2本の 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

供試蓄熱管および蓄熱液については,過冷却状態の 不安定化要因を可能な限り取り除くように,その準備から 実験段階まで細心の注意を払った.

蓄熱管の洗浄は、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 静かに、後述の二回蒸留水を注入し、その上にシリコーン 油を、ピペットを用いて静かに満たし、液液界面を形成し た.このようにすることで、一般的に考えられる凍結核生成 の原因となる諸条件を可能な限り回避した.

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 (信越化学工業,KF96-5CS)を用い,いずれも約 25ml と した.前者の液深は ho=50mm,後者のそれは hw=50mm である.蒸留水は、イオン交換器(オルガノ,SHD1-SA)で 得たイオン交換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、実験毎に保留粒子径 5μm の ろ紙(アドバンテック,No.2)でろ過して使用した.

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た.電場付 与時は、熱電対を退避させた.印加電圧 Eは 35kV とした. 電場付与時の界面挙動の観察実験は蓄熱液温度 t = 25±1℃で行い、凍結実験は $t = -5\pm0.2$ ℃で行った.なお、 供試蓄熱管の過冷却状態維持効果の実験は、装置の冷 却限界である-11℃で行った.

電場付与実験は、系が定常状態に到達後、暫く時間 をおいて開始した.本報告中の時間 τは、電場付与時を 基準時間 0 sとした経過時間、すなわち電場付与時間で ある.τの表示は、撮影画像の対応コマを明確にするため に、小数点以下二桁まで表示している.

2.4 データ整理

Fig.2 は蓄熱管内の液液界面, 三相境界, 電極位置の 概略と, 併せて三相境界の鉛直方向座標軸 h とその基準 位置を示している. 座標軸は, 管中心軸および, 二本の 線電極を含む仮想面(一点鎖線)と, PVC 管の内面との 交線上にあり, 図中の●は基準位置, すなわち E=0kV に おける h=0mm を示している. 三相境界の揺動, 挙動はこ



Fig.2 Definition of reference position of intersection height *h* under no electric field.

の h によって議論する.

3. 結果と検討

3.1 疎水性管の過冷却状態維持性能

Fig.3 は, τ[min]に対する蓄熱管内の水温 t の一例で ある. 冷却期間の t の近似式は次式で与えられ, 冷却速 度は約 0.43K/min, 決定係数は 0.991 である.

$$t=22.00-0.43 \tau$$
 ($R^2=0.991$) (1)

過冷却維持実験は、3サンプルずつ3回,合計9サンプ ルで行った.図のように、−11℃に到達後、12時間以上 保持したが、PVC管内の過冷却水は凍結を開始しなかっ た.この結果は、疎水性面に接する水は凍結遅延を起こ しやすいという報告⁷⁾⁻⁹⁾と同じ傾向であり、過冷却水の凍 結核生成は接触面の濡れ性の影響を受けていると考えら れる.既報⁵⁾では、シリコーン油コーティングを施したガラ ス製試験管を用いているが、この時は−10℃で10時間以 上維持できた.本報告の結果は、著者らのこれまでの実 験研究で得られた最低温度、最長時間であり、PVC管は 望ましい特性を持つと考える.なお、この種の温度や時間 は、水の純度など、他の支配因子の影響を強く受けること から、最低温度、維持時間については、さらなる検討が必 要である.





3.2 三相境界および界面の挙動

PVC 管内に水とシリコーン油を入れると, 両液による液 液界面が形成され, また PVC 管内面, 水, シリコーン油に よって固体と二液体による三相境界が形成される. 従来, このような系に電場を付与した際の三相境界等の挙動の 観察例は見られないようであり, また凍結核生成は経験 的に三相境界近傍で発生することから, ここでは三相境 界等の挙動の一端について述べる. なお, 本観察実験は t =25±1℃の条件で行った.

電場を付与しない条件, すなわち E=0kV では, 三相境 界および液液界面は, Fig.4 および Fig.6(1)のように上に 凸で, 三相境界はPVC 管内面を一周している. PVC 管が 水に濡れ難い材質, すなわち疎水性であることによる.

次に, E を E=0kV から徐々に増加する過程すなわち, 電場強さが増加する過程の挙動について述べる.ある E までは液液界面,三相境界ともに変化は見られない.しか し, E=2.7kV 付近で電極近傍の三相境界に僅かな揺動 が起こる.この揺動の発生は,electrowetting 効果による 見かけの濡れ性の変化に起因すると考えられる.さらに, E を増加すると,この揺動は三相境界に沿って広がり,三 相境界全体に及ぶようになると同時に,この揺動,波紋は 液液界面にも広がる.この揺動は,E の増加によってさら に激しさを増す.液液界面の挙動は三次元的,かつ極め て複雑であって,その一例を示すことさえも困難である.

電場付与に起因する, PVC 管内の境界, 液液界面の 挙動の特徴は, 既報に比して, その激しさ, 変位の大きさ にある. 周期を含む詳細については次節で述べるが, たと えば電場付与中のhの最大値は, 既報 ⁵⁾の約 0.7mm 対 して, 本報告では 11.2mm である. この結果, 既報の変 動は線電極近傍が中心であったのに対し, PVC 管では 電極近傍はもちろん, 全境界および界面の全範囲に広 がっている. 最大値に近い h が発生する頻度も既報に比 して高く, 管内壁との接触面積の変化も大きい. もちろん, シリコーン油および二回蒸留水ともに, 常温の粘度の方 が過冷却下の値より低いことも, 界面が不安定化しやす い一因と考えられる. このような特徴はいずれも, 凍結核 生成を助長するように作用する可能性が高いと判断され る.

このような液液界面,三相境界の揺動は,電場付与に より発生する電極近傍の誘導電荷に起因すると考えら れ,



Fig.4 An example of triple-phase boundary and liquidliquid interface in PVC tube. 電場による界面不安定現象ということができる.しかしながら,従来の電場による液液界面の不安定現象¹⁰⁾とはたとえば,次の点で異なっている.すなわち,本研究では,

①電極は二液のいずれとも接触していない

②電場の方向は液液界面に平行, すなわち水平方向 である.

以上,述べたように,従来,発核の主因とされる三相境 界の揺動が,PVC管の場合にも起こることおよび,PVC管 内面と水の接触面積変化は,見かけ上,既報に比して大 幅に増加することが明らかになった.また,三相境界およ び液液界面の揺動は既報に比して比較的低い印加電圧 で維持でき,現象の激しさは両電極付近で発生した波同 士の干渉を含むことから,凍結核生成に対する電場の消 費電力を低減する効果も期待される.

3.3 三相境界位置の経時変化

前述のように、三相境界、液液界面の挙動は極めて複 雑であり、止むを得ず、その挙動は Fig.2 の座標 h によっ て代表させることにする.以下に、凍結実験で印加する E=35kVの場合について電極近傍の挙動を説明する.な お、この実験は $t = 25 \pm 1$ ° C ° 行ったが、過冷却状態では 途中で凍結が始まり、十分な現象観察時間を取れないこ とによる.

Fig.5は,画像の解析結果であり,正電極側のhの経時 変化の一例を示している.負側のhは正極側とは若干異 なるものの,大差ないことを確認している.

Fig.5 では,電場付与後約0.25sまではhの変化は見ら れず,その後増加している.このhの反応遅延の原因は, 高電圧電源の立ち上がり時間や電荷誘導のタイムラグ等, さらにそれらの複合的影響の可能性がある.実験に使用 した高電圧電源の立ち上り時間が約0.3sであることから, 主として電源の立ち上がり特性によると考える.その後,h は増加し,一定値に到達することなく,増減を繰り返す. 線電極近傍の詳細観察によれば,境界位置は持ち上げ られて高くなった後,次の過程で一旦低下し,その次の過 程でさらに高く持ち上げられて,上下動を繰り返すが,そ のメカニズムは明らかにできていない.しかし,波の反射,



Fig.5 An example of variation of maximum height of intersection with time (E=35kV, t=25°C).

波同士の合成や打ち消し合いを繰り返すことは容易に想像できよう.さらに、上述の過程はもう一方の電極近傍でも起こっており、両者の干渉も起こることから、境界の挙動は一層複雑になる.後述の過冷却水の凍結核生成は、このような複雑で、再現性に乏しい境界、界面の挙動によっていると考えられる.

ここで、Fig.5 をさらに詳しく検討するために、hの山の数,谷の数から振動数および周期の平均値を概算する. 山のプロット、谷のプロットは、次のように判断する.すなわち、n 個目のプロットの値 h_n が、 $h_n > h_{n-1}$ 、 $h_n > h_{n+1}$ を満たすとき、この h_n をピーク(山)値とし、逆に $h_n < h_{n-1}$ 、 $h_n < h_{n+1}$ を満たすプロットをボトムピーク(谷)値と考えることにして、4s 間のピークの数を数える.微妙なプロットもあるので、その数に若干の差が出る点はご了承願いたい.

Fig.5 の山数は 25, 谷数も 25 となり, 平均的に見て周 波数は約 6.25Hz, 周期では約 0.16s となる. 既報 5)の場 合にも微小な揺動は見られるが, ここでは単純に電場付 与の断続周期 10s を考えることにすれば, 本報告の周期 はほぼ 1/6 になり, 管内面の疎水性の影響によると考えら れる. 既報 4).5)では, 電場を 5s 間隔で断続することを繰り 返して三相境界付近の揺動を助長したが, 上述の特徴 はこれに代わる可能性があると考えられる.

一方, Fig.5の振幅については, peak-to-peak値の平均 で約2.5mm程度であり、この値も既報⁵⁾に比して大きい. 電場付与後のhの平均値は約7.5mmであり、電場を付 与し続けていることもあって、 h=0に戻ることはない.しかし、 小幅ではあるが、短周期揺動の継続が見て取れる.この ような大小の揺動が凍結核生成を誘発すると考えられる が、その変位の大きさは少なくとも強くは影響しないとされ ている^{4).5)}ことから、短周期振動が核生成に有効である可 能性が高いと考えられる.

以上のように、本報告では、三相境界の揺動周期、 peak-to-peak 値ともに既報 5よりも大きく、このことが凍結 開始に結び付く可能性が高いと考えられる.

3.4 過冷却水の凍結開始

Fig.6 は,電場付与後の液液界面および三相境界近 傍の挙動を撮影した動画から,特徴的な画像を取り出し てスケッチを付したものである.写真では少々見難いが,中 心付近に見える二本の縦線のうち,左が負の線電極である.ま た,右側に見える縦線は正の線電極であるが,被写界深 度の影響で薄く写っている.

Fig.6(1)は電場を付与した瞬間, すなわちτ=0sの写 真である. Fig.5 でも述べたように, 界面等の揺動開始に は遅れがあるので, この時点では界面は静止している. 写 真(2)はτ=1.26sである. 三相境界, 液液界面は電場の影 響を受けており, 激しく揺動している. この挙動には, 前述 のように, electrowetting 効果が寄与していると考えられる が, 詳細は明らかでない. 揺動の詳細をスケッチで表現す ることは容易ではないが, 正負両電極で発生した境界の 持ち上がりの影響は, 三相境界の全体および液液界面



Fig.6 Behavior of intersection and liquid-liquid interface, and freezing initiation of supercooled water under electric field, photographed from negative electrode side (E=35kV, t=-5°C).

に及んでいることが分かる. h は, Fig.5 に示したように, 変 動を繰り返している. Fig.6 に示したサンプルでは, 次の写 真(3)すなわち τ =1.29s において, 奥の電極近傍の三相境 界付近, すなわちスケッチに Ice と記した位置に氷核が発 生し, 凍結を開始した. 写真(4)は τ =1.63s の写真である. 氷核発生後も, 未凍結部分の三相境界は揺動を継続す る. 一方, 氷核は成長して氷が占有する領域が増大する. この凍結した部分は揺動を停止する. 繰り返し観察した 結果, 氷結晶の成長は, 線電極に沿って進んでいるよう に見え, 凍結した部分から, τ =2.78s の写真のように, 揺 動を停止している. なお, 写真は省略したが, 過冷却水の 二か所で凍結核生成を起こしたサンプルもあり, 既報の実 験では見られなかった現象である. 本報告の系の揺動が, 発核に対してより有利であることを示していると考えられる. PVC 管と電場付与の相乗効果の可能性が高いと思われ るが,その詳細については明らかにできていない.

3.5 電場付与後の経過時間と凍結開始サンプル数

Fig.7 は, τ に対する凍結開始相対度数 P および累積 凍結開始サンプル数 N_fを示している. P は次式(2)で定義 し, ここに N は全サンプル数である.

$$P = N_{\rm f} / N \tag{2}$$

図では,時間 $i \leq \tau < i+1$ (i=0, 1, 2, ...)の 1s の間に凍結 を開始したサンプル数を,時間 $\tau=i+1$ にまとめて示した.

Fig.5 でも述べたように, 電場付与後約 0.25s の間は三 相境界の揺動現象が見られない.しかし, Fig.7 のように, 0~1sに4サンプルの凍結を確認できた.この凍結は0.3s $\leq \tau < 1s$ に起こっていることになり, 揺動が始まると, ほぼ 時を同じくして凍結を開始するサンプルが出現することを 示している. その後は, 時間の経過とともに, 凍結を開始 するサンプル数が増加し、4~5sにその割合が最大になる. 全サンプルの約80%が5s以内に凍結を開始し,10s以内 に全サンプルの凍結が始まっている.一方,既報 5)の実 験結果では,時間の取り方が異なるものの,凍結を開始 するサンプル数が最大になる時間は初めの0~10sにある. したがって,この点においては,既報と本報告の間に特段 の差は見られない.しかしながら、最長の でを比較すると、 既報 5)では P=0.94 に到達するのに要する t は約 150s で あったのに対して,本報告では P=1 で 10s である. 既報で はP<1 であることを考慮すると、 τは約 1/15 以下であり、 大幅に短縮されている.また,既報が E=35kV, 周期 10s, デューティ比 0.5 の断続電場付与時の値であるのに対し て、本報告は E=35kV, 連続付与時の値である.

既報⁵⁾では蓄熱管内面にシリコーン油コーティングを施 しており,濡れ性の点では本報告と同条件とみてよい.こ の油コーティングの条件下では,全 34 サンプルのうち,τ ≦10sの凍結開始数は9であり,そのPはP≒0.26であっ て,全体の1/4強である.本報告の条件との大きい違いは, 少なくとも表面的に見る限り,揺動周期と考えられ,今後 この影響についてさらに検討が必要であろう.

以上のことから、本報告で用いた材質、方法は、少なく とも凍結核生成に関する限り、優れた方法であると判断で きる.上述の特徴、すなわち核生成の起こり易さや核生成 までの時間が短縮される理由を、Fig.6 等から説明するこ とは困難であるが、次のような従来と異なる点が効果的に 作用している可能性がある.すなわち、電極近傍の三相 境界の持ち上がり高さが大きく、上方に引き上げられた水 が PVC 管内面と見かけ上接触している面積が大きい.ま た、周期が短いことは、移動速度が速いことを意味する. これらは今後検討すべき因子であると考える.なお、本研 究 で観測された三相境界の変位速度は最大で約 47mm/s であり、既報のそれと比べて 5 倍以上であった. 凍結核生成に対する極性の影響については、全サンプル 数 30 に対して、正極側、負極側それぞれ 65%、35%であ り、それぞれほぼ 2/3、1/3 であった.しかし、この差の原



Fig.7 Relation between relative frequency for freezing initiation, number of frozen samples and lapsed time under electric field (E=35kV, t=-5°C).

因は明らかにできてない.

以上のように、凍結が起こり難い、あるいは凍結遅延が 起こるとされる面においても、電場付与によって凍結開始 を促進できることが示された.なお、実機においては、蓄 熱管の熱伝導率や、繰り返し温度変化に対する耐性の 問題など、検討すべき課題があることを付言したい.

3.6 漏れ電流による発熱の影響

本報告の実験では,前述のように,電圧を連続的に印 加,すなわち電場を連続的に付与している.したがって, 熱媒として用いたシリコーン油中の漏れ電流は,連続的 にジュール熱を発生することになり,熱媒温度の上昇につ ながる可能性を否定できない.温度上昇は,過冷度を低 下させ,結果として凍結核生成を起こし難くする方向に作 用する.以上のことから,漏れ電流による消費電力の確認 が必要と判断して,以下の測定を行った.

Fig.8 はシリコーン油の温度 t に対する漏れ電流 I および消費電力 $P_o=EI$ の変化を示している. プロット〇および ●は本報, プロット△および▲は既報 ⁵⁾のデータであり, 白抜きのプロットは P_o , 黒塗りのプロットは I の各値を示している.

Fig.8より,本研究における*t*=−5℃の*P*。は約0.84Wであり,内面をシリコーン油でコーティングしたガラス管を用いた既報⁵⁾の約0.9Wに対して小さくなった.シリコーン油



Fig.8 Relationship between dc current and temperature (E=35kV).

は,保存・管理の状態から推してほぼ水で飽和した状態で ある.したがって,漏れ電流は主としてシリコーン油を介し て起こると考えられるので,蓄熱管材質の影響は小さいと 判断できる. Po がすべてジュール熱になると仮定すると, 蓄熱管一本当たり約 0.3W である.この発熱は,電場の付 与時間,すなわち最大で 10s 続くので,発熱量は一本当 たり約 3J となり,主として熱媒の温度を上昇させる.しかし, Fig.7 のように,凍結核生成は比較的短時間で起っており, この加熱の影響は小さいと判断される.なお,実機では熱 媒は何らかの冷熱源との間を循環することから,この温度 上昇の影響はさらに小さくなり,実用上の問題,例えば過 冷度の低下等を引き起こす可能性は低いと考える.

4. まとめ

軟質ポリ塩化ビニル管(軟質 PVC 管)内に,水とシリコ ーン油を入れると,管内面と水,シリコーン油による三相 境界および,水と油による液液界面が形成される.これら の境界および界面は,管外から線電極によって付与され た電場によって揺動する.その運動挙動を観察し,過冷 却水に対するその凍結開始効果を実験的に検討した. 結果は,以下のようにまとめることができる.

- (1)線電極によって付与した電場により,三相境界および 液液界面は揺動を起こす.その変位, 搖動の周期, 振 幅の平均値の一例を示した.
- (2) PVC 管内で発生した揺動の周期は,平均的に見て, 従来の電源の断続により得られる揺動の周期よりも短く, 振幅は大きい.この揺動現象は凍結核生成を効果的 に誘発する可能性が高いと判断できる.
- (3) 三相境界および液液界面の揺動現象は両電極付近 で発生した波同士の干渉を含み,核生成に対する電 場の消費電力を低減する効果が期待される.省エネル ギー的に揺動を継続できるため,核生成に対するエネ ルギーが小さくて済む可能性がある.
- (4)濡れ性が低いことは、電場付与による凍結核生成に 対して、阻害要因にならないことが明らかになった.な お、電場を付与しなければ、過冷却状態の蓄熱液が自 発的に発核する可能性を低下させ、過冷却状態の長 期的安定化に資するとの結果が得られた.

5. 謝辞

実験およびデータ整理には,藤本研究室の学部生 谷本 拓也,中川 翔太の諸君の協力を得た.記して謝意 を表す.

6. 参考文献

- 平野聡,齋藤武雄,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),325,仙台市.
- 2) 平野聡,齋藤武雄,過冷却蓄熱装置の熱特性,太陽
 /風カエネルギー講演論文集 (2003),297,足利市.
- 3) 平野聡, 齋藤武雄, 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), 277, 北九州市
- 4) 栩谷吉郎,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,42(1),69-75(2015).
- 5) 藤本雅則, 栩谷吉郎, 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, 太陽エネルギー, 43(3), 59-65(2017).
- 6)Pruppacher, H.R., The effect of an External Electric Field on the Supercooling of Water Drops, Journal of Geophysical Research, 68 (15), 4463-4474 (1963).
- Stefan Jung, Marco Dorrestijn, Dominik Raps, Arindam Das, Constantine M. Megaridis, and Dimos Poulikakos, Are Superhydrophobic Surfaces Best for Icephobicity?, Langmuir, 27 (6), 3059-3066 (2011).
- 8) Ludmila Boinovich, Alexandre M. Emelyanenko, Vadim V. Korolev, and Andrei S. Pashinin, Effect of Wettability on Sessile Drop Freezing: When Superhydrophobicity Stimulates an Extreme Freezing Delay, Lagmuir, 30 (6), 1659-1668 (2014).
- 9) Sara Moghtadernejad, Mehdi Jadidi, Moussa Tembely, Nabil Esmail, Ali Dolatabadi, Concurrent Droplet Coalescence and Solidification on surfaces with Various Wettabilities, Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, 137 (7), 071302-1–071302-10 (2015).
- Taylor, G., Disintegration of water drops in an electric field, Proceedings of Royal Society of London, A.280, 383-397 (1964).