着霜現象に対する電場の効果*

宗像鉄雄^{*1}, 矢部 彰^{*1}, 棚澤一郎^{*2}

Effect of Electric Field on Frosting Phenomenon

Tetsuo MUNAKATA, Akira YABE and Ichiro TANASAWA

The effect of electric field on frosting phenomenon is investigated. It is known that the frost formation on a heat exchanger seriously affects the performance of the system, and that the application of electric field is one of the promising procedures because dielectric water molecules play a role of solidification nuclei. In order to understand the fundamental characteristics of the frosting phenomenon under the electric field, experiments have been carried out. The electric field is applied between the frosting surface and the mesh electrode which is placed in parallel with the surface. The results of experiments reveal that the apparent mass transfer rate is decreased and the heat transfer rate is increased by applying the electric field because the dendritic frost crystal is removed by the strongly imposed electric field.

Key Words: Heat and Mass Transfer, Frost Formation, Defrosting, Thermal Engineering Natural Convection, Electric Field

1. はじめに

着霜現象は、湿り空気が0°C以下の冷却面に接触し、空気中の水分子が冷却面上で凝固する現象である。これは、空気を熱源とするヒートポンプシステムなどの熱交換器においてしばしば観測される現象であり、着霜が発生すると熱や空気流動の抵抗が増大するため、システムの効率が著しく低下する。したがって、着霜現象を能動的に制御することができれば、システムの高効率化が達成されるものと思われる。一方、誘電性物質に電場を付与することにより、物質内に電磁力が加わり伝熱性能が大きく変化することはよく知られた現象であり、特に最近では、沸騰、凝縮における伝熱促進との関連で注目されている。誘電性物質内では電流が流れないため、与えるエネルギーが少なくても大きな伝熱促進効果が期待できるからである。着霜現象で重要となる水分子は誘電性物質であることを考えると、着霜現象に対しても電場は何らかの影響があるも

のと考えられる。本研究では、着霜を制御する一つの手法として電場を利用することを考え、着霜面付近に電場を作り、電場が着霜現象にどのような影響を与えるかを、周囲の湿度や電場の形態(直流・交流)を種々変化させて実験的に調べた。

記号

A : 伝熱面積	m^2
C_i : 氷の比熱	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_w : 水の比熱	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
E : 電場の強さ	V/m
F_{12} : 形態係数 (=1と仮定)	
H : 絶対温度	kg/kg'
h : 着霜高さ	m
m_a : 見掛けの着霜重量	kg
m_t : 総着霜重量	kg
q : 全熱流束	W/m^2
q_c : 対流による熱流束	W/m^2
q_m : 物質移動(着霜)による熱流束	W/m^2
q_r : 放射による熱流束	W/m^2
r_e : 水の露点温度における蒸発潜熱	J/kg
r_m : 氷の融解潜熱	J/kg
T_a : 周囲温度	$^{\circ}\text{C}$

* 平成2年5月30日 第27回日本伝熱シンポジウムおよび平成3年5月30日 第28回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成3年9月9日.

^{*1} 正員, 工業技術院機械技術研究所(●305 つくば市並木1-2).

^{*2} 正員, 東京大学生産技術研究所(●106 東京都港区六本木7-22-1).

- T_d : 露点温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_f : 霜表面温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_s : 伝熱面表面温度 $^{\circ}\text{C}$
 t : 経過時間 min
 w : 着霜速度 kg/s
 ϵ : 誘電率 F/m
 ϵ_0 : 真空の誘電率 ($=8.854 \times 10^{-12}$) F/m
 ϵ_f : 霜の放射率 ($=0.98$ と仮定)
 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($=5.67 \times 10^{-8}$) $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 σ_e : 導電率 S/m
 τ_0 : 電荷の緩和時間 $=\epsilon/\sigma_e$ s

2. 着霜性状に対する電場の効果

2.1 実験装置および方法 観察用の実験装置の概略図を図1に示す。この装置は大きく分けて①実験容器、②真空ポンプ、③水蒸気発生装置、④空気ポンベ、⑤高電圧発生装置により構成されている。実験容器は厚さ20 mmの亚克力でできており、着霜現象を可視化できるようにしてある。伝熱面は直径20 mmのステンレス鋼製円柱を使用し、その背面に -40°C に冷却した冷媒を流し冷却した。伝熱面表面温度は伝熱ブロック中心軸上に3本の銅-コンスタンタン熱電対(線径127 μm)を埋め込み測定した。側面を断熱するため、伝熱ブロックは直径100 mmの亚克力に取付け、水平上向き面となるように実験容器に設置した。また、容器内部の圧力を測定するため、低圧用圧力計(測定レンジ0~25 Torr)および高圧用圧力計(測定レ

ンジ0~2 kgf/cm^2)を、容器内の湿度を測定するため、鏡面冷却式露点計 (General Eastern 社製 1111H) をそれぞれ容器上部に設置した。湿度の制御は、まず容器を真空ポンプで 10^{-2} Torr程度の真空にし、次に水蒸気発生装置より水蒸気を容器内に導き所定の圧力とし、最後に空気ポンベより空気を導入し、標準大気圧101.3 kPaとすることにより行った。本実験では、メッシュ電極(線径0.5 mm, ピッチ2 mm)を伝熱面から10 mm離して設置し均一電場となるようにした。また、容器側面からハロゲンランプのスリット光を照射し、霜層性状の変化を観察した。実験は、初期容器内温度 $T_d=18^{\circ}\text{C}$ と設定して伝熱面の冷却を開始し、着霜実験中に伝熱面表面温度 T_s が 18°C から -30°C まで変化する条件の下に、初期湿度 H および電場の強さ E を種々変化させて実験を行った。なお、本実験では密閉容器内部に恒温・恒湿装置を組み込まなかったため、容器内の温度および湿度を一定に保ちながら実験を行うことは困難であった。本実験では、実験開始後1 hを観察の対象としたが、実験終了時には、容器内温度は伝熱面上5 cmの位置で約 2°C 低下し、湿度は、伝熱面上15 cmの位置で、例えば初期温度 $H=8.5 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}'$ ($T_d=11.7^{\circ}\text{C}$)の場合、 $H=3.0 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{kg}'$ ($T_d=-3.0^{\circ}\text{C}$)まで低下した。

2.2 結果および考察 霜層性状に対する電場の効果を観察した結果、ある条件下では電場を印加する

図1 着霜性状観察用実験装置の概略図

図2 着霜性状に対する電場の効果

ことにより霜層性状が大きく変化することを見いだした。結果の一例を初期湿度 $H=8.5 \times 10^{-3} \text{ kg/kg'}$ ($T_d=11.7^\circ\text{C}$) の場合について電場を印加しなかった場合と印加した場合 ($E=1.0 \times 10^6 \text{ V/m}$) を比較して図2に示す。電場を印加しなかった場合には、林ら⁽¹⁾が報告しているAあるいはBの成長形態に近いものとなっている。すなわち、最初に針状晶が発生し、次に、この針状晶の間を埋めるように結晶が成長し、最終的には表面が平坦化している。一方、電場を印加した場合には、霜層表面に初期に発生する針状晶は、印加しなかった場合と比較して径が小さく、その高さがより高くまで成長している。また、電場を印加しなかった場合には針状晶は1本の結晶となっているが、電場を印加すると針状晶の先端が枝分れし、樹枝状晶のようになっている。しかし30 minほど経過すると、そのような樹枝状晶や針状晶は現れず、ほぼ着霜面は平面となって成長している。電場の効果が顕著に現れる実験開始後10 min 10 sから5 s間隔で撮影した写真を図3に示すが、5 sの間に針状晶の大きさや本数などの性状が大きく変化していることがわかる。目視観察では針状晶が消えるように見えたため、200 こま/sの高速度ビデオによる観察を行った。その結果、針状晶が電場の効果により着霜面から取り去られていることがわかった。これは、電場を強くしたため、電場印加による応力(Maxwell 応力)が針状晶の引張強さより大きくなり、針状晶に引張破壊が発生し伝熱面から取り去ら

れたものと思われる。

また、初期湿度を低くし、 $H=4.9 \times 10^{-3} \text{ kg/kg'}$ ($T_d=3.6^\circ\text{C}$) とした実験も行ったが、この場合には、印加する電場の強さ E を $1.5 \times 10^6 \text{ V/m}$ 程度まで高めても上述したような現象は現れず、霜層性状は、電場を印加しなかった場合とほぼ同一の成長形態となった。この成長形態は林らが分類しているCあるいはDの成長形態に相当するもので、針状晶の鉛直方向への顕著な成長は認められず、霜層は表面がほぼ平坦のまま成長した。

なお、初期湿度 $H=8.5 \times 10^{-3} \text{ kg/kg'}$ ($T_d=11.7^\circ\text{C}$) の場合、実験開始後30 min以降電場を印加しても霜層性状が変化しなかった理由は、容器内の湿度が低下し、着霜を進行させる駆動力が低下したためと考えられる。

これらの観察結果から、本実験装置では湿度が比較的高く、着霜が針状晶の形態で成長する場合、電場は霜の鉛直方向の成長に対して大きな効果を持ち、針状晶は、発生・成長・離脱をある一定期間(最終的に伝熱面近傍での水蒸気濃度こう配が小さくなり、熱的過冷がなくなるまで、すなわち針状晶を発生させる駆動力がなくなるまで)繰返すことがわかった。これは、ある条件下では電場印加により除霜が可能であることを示している。

3. 着霜伝熱および物質移動特性に対する電場の効果

3.1 実験装置および方法 伝熱および物質移動

特性を詳細に測定するために上記の装置とは異なる実験装置を用い実験を行った。これは、上記の装置では、着霜が進行するにつれて容器内の湿度が低下し、着霜形態を一定に保つことが困難なため、着霜伝熱などに対する電場の効果を正確に測定することが困難だったためである。装置は大きく分けて、温度・湿度を一定に保つための恒温・恒湿室、周囲の流動による乱れの影響をなくし伝熱面を固定するための実験小室、そして伝熱面本体の三つからなっている。恒温・恒湿室は、ビニールシートで組み立てたもので、 $2.2 \text{ m(W)} \times 2.2 \text{ m(L)} \times 2.4 \text{ m(H)}$ の大きさであり、その中に、恒温・恒湿維持装置を設置し温度および湿度を一定に保持できるようにした。実験小室は発泡スチロールとアクリル板でできており、 $0.6 \text{ m(W)} \times 0.4 \text{ m(L)} \times 1.8 \text{ m(H)}$ の大きさとなっている。この上部および下部に $0.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ の穴を設け、周囲の温度および湿度と同一の条件が実験小室内部でも実現されるようにした。なお、周囲の温度および湿度は、実験小室上部に設

図3 電場印加の効果(5 s間隔での連続写真)

けた穴の所に銅-コンスタンタン熱電対(線径 127 μm)および露点計(2章と同一)を設置し測定した。また、伝熱面は図4のような構造になっており、これを実験小室の高さ 1 m の位置に伝熱面が鉛直面となるように設置した。伝熱面は、背面に熱電素子を設け冷却し、その背面を約 -25°C に冷却した冷媒を循環させることにより一定温度に保った。電極は2章と同一のメッシュ電極を使用し、伝熱面から 10 mm 離して設置した。実験は、まず恒温・恒湿維持装置を調整し、恒温・恒湿室の中を、一定の温・湿度に保つ。この間に、伝熱面の表面を発泡スチロールのふたで覆いながら伝熱面を冷却する。次に、伝熱面表面温度が一定に達したのを確認してからふたを取り除き実験を開始した。実験は、電場がない場合、DC+10 kV, DC+15 kV, DC-10 kV, AC 20 kVp-p/50 Hz, 同/500 Hz, 同/1 000 Hz をそれぞれ電極に印加した場合の7ケースについて、同一の伝熱面を使用し、着霜重量、着霜高さ、熱流束などの変化を測定した。着霜重量は、伝熱面に形成された霜を 30 min ごとにかき取り、1/100 g まで読取ることのできる精密てんびんで測定した。着霜高さは、霜側面を写真撮影し、この写真から読取った。熱流束については、図4に示した熱電対で、TC1とTC2の温度差から求めた。なお、周囲の条件は、室温 $T_a=17^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $H=7.86\times 10^{-3}\text{ kg/kg'}$ ($T_a=10.5^{\circ}\text{C}$)、伝熱面表面温度 $T_s=-27^{\circ}\text{C}$ で一定とし、針状晶が発生する条件の下に実験を行った。測定は、実験開始後 120 min までを対象とした。また、実際には霜表面温度 T_f を測定することも重要であるが、電場印加時に熱電対を挿入し測定することは困難なため、本実験においては測定を行っておらず、 $T_f=0^{\circ}\text{C}$ と仮定した。

3.2 結果および考察 図5に着霜重量の時間変化を示す。なお、図5以降、図中のパラメータは、電極に印加したポテンシャルを示す。着霜重量は、電場を印加しなかった場合と比較して、電場を印加した場合

図4 伝熱特性測定用伝熱面の概略図

にはいずれの電場の形態においても減少した。これは2章で述べた電場による除霜作用によるものと考えられる。さらに、直流電場と交流電場を比較すると、直流のほうが交流より着霜重量が少なく(除霜作用が大き)、電場を印加しない場合と比較して直流で約25%、交流で約16%減少していることがわかる。なお、交流については、2h後の重量のみを測定し、図5には代表的に50 Hz の場合を示したが、500, 1 000 Hz と周波数を変化させても50 Hz の場合とほぼ同一の結果となった。直流と交流のこのような差異は霜中での電荷の緩和時間を考えると説明できる。すなわち、氷の場合、誘電率 ϵ 、導電率 σ_e は温度の関数であるが、代表的に -10°C の場合を考え、 $\epsilon=100\epsilon_0$ 、 $\sigma_e=10^{-8}\text{ S/m}$ とすると、電荷の緩和時間 $\tau_0=0.08854\text{ s}$ となり、約10 Hz 以上の交流の下では、霜を誘電体として取扱わなければならないことになる。一般に、誘電体に働く Maxwell 応力は、導体に働く Maxwell 応力より小さくなるため、電場による除霜作用が、霜に働く Maxwell 応力の作用によるものと考え、今回実験を行った50~1 000 Hz の範囲で、直流電場より除霜効果が低いという結果が得られたことは妥当であると考えられる。また、直流電場印加時には図5中に破線で示したように、電場の強さおよび極性を変化させてもほとんど変化しなかったが、この現象については、今後種々の条件下で実験を行い、一般性のある現象かどうか確認する必要があると思われる。

図6は着霜高さの時間変化を示したものであるが、電場を印加した場合と印加しなかった場合とを比較すると、電場を印加しなかった場合には、ある一定の曲線的な変化に従って増大するのに対し、電場印加時には、初期に着霜高さが増大し、その後、電場を印加し

図5 着霜重量の時間変化

なかった場合の高さに漸近するという結果が得られた。これは、2章で述べたように、電場を印加することにより針状晶の鉛直方向の成長速度が増大するためである。なお、この高さは、伝熱面のほぼ中央部に形成された針状晶先端の高さを測定したものである。

霜層が形成していく様相を電場を印加しない場合と印加した場合を比較して図7に示す。左側が伝熱面のほぼ中央部を拡大して霜層を側面から見た写真、右側が伝熱面全体を正面から見た写真である。電場を印加することにより、着霜密度が減少し、120 min 経過しても霜層が比較的粗状態を保っていることがわかる。

また、熱流束の測定結果を図8に示すが、電場を印加することにより熱流束が増大していることがわかる。特に、+10 kV 印加時と-10 kV 印加時を比較すると、同一の電場の強さでは、その極性に依存せず、熱流束はほぼ同じように上昇すること、また、+10 kV 印加時と+15 kV 印加時を比較すると、電場を強

くするにしたがって熱流束が増大していることなどがわかる。

一般に、着霜時の熱流束 q は、自然対流による寄与 q_c 、放射による寄与 q_r 、物質移動による寄与 q_m と三つに分けて考えることができる⁽²⁾。本実験においては、周囲の温湿度の条件を一定にしたため、 q_c および q_r は、ほぼ一定と仮定すると、電場による熱流束の増加は、物質移動（着霜）が促進されたことを示している。また、測定された着霜重量を比較すると、電場により着霜が促進されるにもかかわらず、着霜重量は減少しているため、除霜が促進されていることも示している。なお、電場印加により、伝熱面近傍の空気流動が変化することや、着霜密度が変化することにより霜層の見掛けの熱伝導率さらには霜層の表面温度が変化することなどを考えると、 q_c および q_r が一定という仮定は妥当ではないが、電場により、どの程度着霜が促進されたか、また、どの程度除霜されたかを見積もるために本仮定を使用し、着霜重量について考察する。すなわち、図5の値は、伝熱面表面に付着している霜層の重量であり、電場により除霜された分の重量は含まれていないため、図5に示した着霜重量を見掛けの着霜重量 m_a 、電場によって除霜された分を含む着霜重量を総着霜重量 m_t と呼ぶことにし、総着霜重量について考察する。最初に、電場印加時の q_m を求め、次にこの値を使用して m_t を求める。電場を印加した場合の q_m は、

$$q_m = q - q_c - q_r \dots\dots\dots (1)$$

により求めることができる。 q_r は周囲の温度条件から計算することができるが、 q_c は伝熱面の性状により変化するため、これまで得られた整理式を用いて計算することはできない。

一方、本実験においては、電場を印加した場合と印

図6 着霜高さの時間変化

図7 着霜の様相の比較

図8 熱流束の時間変化

図 9 熱流束を分離した結果

図 11 総着霜重量の比較

図 10 物質移動(着霜)による熱流束の比較

加しない場合とを比較すると、着霜性状は若干異なるが、周囲の温・湿度条件を同じにしたため、 q_c は同一と仮定する。したがって、電場を印加しない場合の q_c が求められれば、上記の手法により電場印加時の q_m を計算することができる。以下で電場を印加しない場合の熱流束を分離し、 q_c を計算する。電場を印加しない場合、 q_m 、 q_r は、

$$q_m = \frac{w}{A} \left\{ r_e + C_w(T_d - T_f) + r_m + \frac{C_i}{2}(T_f - T_s) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$q_r = \sigma \epsilon_f F_{12} \{ (T_a + 273.15)^4 - (T_f + 273.15)^4 \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

により計算することができるため、

$$q_c = q - q_r - q_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

により対流による熱流束を求める。分離した結果を図9に示すが、放射および物質移動による熱流束は時間によらず一定、対流による熱流束は、ほぼ

$$q_c = 582.0 - 127.9 \cdot \log(t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

に従って変化するという結果が得られた。

以上より、電場を印加した場合の q_m は、式(3)と式(5)を式(1)に代入すれば計算できる。結果を図10に示すが、電場を強くするにしたがって q_m が増大していることがわかる。次に、この結果を使用して、電場印加時における総着霜重量を求めると図11のようになり、電場を強くするにしたがって m_i も増大していることがわかる。例えば、10kV印加時には m_i は m_a の約1.5倍であるのに対し、15kV印加時には、2倍程度となっている。これは、電場を強くするにしたがって除霜も促進されていることを示している。電場を強くするにしたがって着霜が促進される理由は、電場を強くするとより多くの針状晶が霜層表面から取り除かれるため、霜表面の温度の低い領域が拡大されるためと考えられる。なお、 m_i の計算においては、 q_c を電場を印加しない場合と同一と仮定した誤差や霜表面温度を0°Cと仮定した誤差を含んでいるため、今後、電場中でも正確に自然対流熱流束や霜層表面温度を測定できるようにし、 q_m や m_i を正確に求めなければならないと思われる。

4. ま と め

着霜現象に対する電場の効果について密閉容器を用いて実験を行い、霜層性状は、電場印加により大きく変化することを明らかにした。すなわち、針状晶が発生する系に電場を印加すると、針状晶は発生・成長・離脱を繰返すため、電場による除霜が可能であることが明らかとなった。

さらに、自然対流下、鉛直面の着霜伝熱面に対して電場を印加した実験を行い、以下の結果が得られた。

(1) 見掛けの着霜重量は、電場を印加することにより減少し、その効果は、交流より直流のほうが顕著である。

(2) 熱流束は、電場を強くするにしたがって増大する。これは、針状晶が電場によって霜層表面から取り除かれるため、常に低温の表面が霜層表面に出現し、着霜が促進され、総着霜重量が増大するためである。

(3) 着霜高さは、電場印加時には初期に高くなるが、しだいに電場を印加しなかった場合の高さに漸近する。

文 献

- (1) 林・青木, 機論, 43-368(1977), 1384.
- (2) 田島・ほか3名, 冷凍, 46-522(1971), 11.