



# 中性子ラジオグラフィを用いた 熱交換器への着霜の評価



松本 亮介 Matsumoto Rvosuke (関西大学システム理工学部)(関西大学大学院理工学研究科)(関西大学システム理工学部)



智也 吉村 Yoshimura Tomoya



梅川 尚嗣 Umekawa Hisashi



網 健行 Ami Takevuki (関西大学システム理工学部)



伊藤 大介 Ito Daisuke (京都大学原子炉実験所)



齊藤 泰司 Saito Yasushi (京都大学原子炉実験所)

## **1** 着霜とは

0℃以下の冷却面に湿り空気が接すると、着 霜が起こる。図1に着霜現象を冷却面正面から 観察した顕微鏡写真を示す。空気中の水蒸気か らの逆昇華によって冷却面に氷滴が発生し、そ の氷滴から針状の霜が成長した後,樹枝状に遷 移し、 霜結晶と空気の多孔質の霜層に成長する 様子が観察される。この霜層は、空気から冷却

\* 中性子応用専門委員会

面への熱移動を阻害すると同時に,空調機器の 熱交換器であれば, 霜層が空気側の流れの圧力 損失を増加させ、空気流量が低下を招き、熱交 換器の性能を低下させる。

日本における霜研究は、理学の分野から始め られたと言われている<sup>1)</sup>。世界で初めて人工雪 の実験に成功し、雪の結晶の生成条件を明らか にした中谷宇吉郎は,まず人工霜の研究を行 い、霜の結晶の生成機構から研究に取り組ん だ<sup>2)</sup>。工学的な研究については、1960年代後半 から日本での着霜研究が活発化し、霜層成長過

程の観察, 霜層物性値, 霜層成長の解析モデ ル, 着霜センシングなどの分野において着霜研 究が進んだが<sup>3)</sup>, いまだ着霜現象のメカニズム が解明されたとは言い切れない。

着霜は,熱移動と物質移動が同時に起こり, 霜層の成長とともに結晶構造が変化する非定常 現象である。霜層の物性値(霜密度や熱伝導率 など)は,霜層内の厚さ方向に分布を持つと同 時に,時間的にも変化する<sup>4)</sup>。霜層の成長を予 測するモデルの構築は,空調機器の効率的な運 転を実現するために重要であるが,そのベース となる着霜量の測定や霜層の物性の評価でさえ 困難が伴う<sup>3)</sup>。

放射線透過法を用いた霜層の測定は,非接触 であることから,着霜量や霜密度の評価に有効 である。1968年にG.J. Trammell ら<sup>5)</sup>は,<sup>144</sup>Ce と<sup>144</sup>Prの放射性物質を平板の冷却面内に埋め 込み,冷却面上の霜層による放射線の減衰から 着霜量を計測し,霜層内の厚さ方向の密度分布 霜密度の評価を行った。1978年にはC.J. Cremers ら<sup>6)</sup>がγ線を,1991年にはT.Y. Bong ら<sup>7)</sup>がγ線及びβ線を用いて,円柱冷却面上 に着霜した霜密度分布の計測を行っている。霜 層厚さ方向の霜密度分布の計測は,これら3件 の放射線透過法の利用以外には,下村信雄ら<sup>4)</sup> によるカミソリで0.5 mmごとに霜を削り取っ て測定したデータしかない。

筆者らは、中性子の物質による減衰の差異を 利用した放射線透過法の1つである中性子ラジ オグラフィを用い,着霜の評価を試みた。熱中 性子線は水には強く減衰するのに対し,アルミ ニウムに対してはよく透過する。アルミニウム 製の熱交換器であれば中性子に対してほぼ透明 となり,熱交換器内に着霜した霜層を可視化計 測することができ,着霜量の定量評価が可能と なる。

本稿では、平成23~24年度に京都大学原子 炉実験所にて実施した研究成果<sup>8)</sup>の紹介と、着 霜研究への中性子ラジオグラフィの利用の今後 展望について述べる。

## 2 フィンチューブ熱交換器での着霜評価

京都大学原子炉実験所(KUR)の B-4 実験孔 において,強制対流下でのフィンチューブ熱交 換器への着霜量分布の測定を行った。

図2に実験に用いたフィンチューブ熱交換器 を示す。家庭用冷蔵庫に用いられているフィン チューブ熱交換器を流用した。フィンは60mm ×28mm,厚み0.12mmのアルミニウム製であ り,直径8.5mmのチューブ2本の内部に−19 ℃の冷媒(ナイブライン)が流れる。フィン間 隔は10mmである。

図3に示す循環風洞のテストセクション内に フィンチューブ熱交換器を設置し、約5.4℃の 湿り空気を熱交換器の下方から流し、着霜させ た。図3(a)のテストセクション内の破線の領 域が中性子の照射域であり、幅40 mm×高さ 68 mm である。図3(b)に撮像システムを示 す。中性子はフィンに対して垂直に照射され、



図1 霜の顕微鏡写真(写真幅 1.4 mm, 冷却面温度 -24.2℃, 主流温度 23.6℃, 相対湿度 33.7%)

20 min



10 min



(a) 正面図

(b) 側面図と撮像システム

図3 中性子ラジオグラフィによるフィンチューブ熱交換器への着霜の可視化実験装置



(a) 無着霜画像(b) 着霜画像(c) 着霜量分布図4 フィンチューブ熱交換器での無着霜・着霜時の中性子ラジオグラフィ画像と着霜量分布

透過した中性子線は蛍光コンバータで可視光に 変換された後、ミラーを介して CCD カメラで 撮影される。なお、テストセクション下流部か らもデジタルカメラにて着霜の様子を撮影し た。

実験開始前の無着霜時の中性子ラジオグラ フィの画像を図4(a)に,着霜時の画像を図4 (b)に示す。露光時間は30秒である。無着霜 時の画像中央の2つの丸い影は,チューブ内を 流れるナイブラインの影響である。着霜時に は、フィン及びチューブ表面での霜層による中 性子の減衰により"影"として表れている。着 霜時の画像から無着霜時の画像を差し引き、水 の質量減衰係数を用いて処理することにより、 図4(c)に示す着霜量分布を算出することがで きる。

霜は氷の結晶である。結晶構造により水と氷 の質量減衰係数に差が顕著に現れるのではない かとの懸念があったが,別途,質量減衰係数を 測定した結果,水と氷の相の違いによる差は確



図5 熱交換器での着霜写真と中性子ラジオグラフィによる着霜量分布,物質伝達率分布

認されなかった。Y. Kiyanagi ら<sup>9</sup>の報告においても、10 Å以下の低波長の熱中性子では、 軽水とその氷の中性子に対する微視的全断面積 に大きな差はないことが報告されている。

図5に、着霜開始後60分における(a) デジ タルカメラによる熱交換器下流側からの着霜写 真. (b) 中性子ラジオグラフィによる着霜量分 布. そして (c) 物質伝達率分布を示す。着霜写 真中央の銀色の棒は湿度計である。(a)の写真 では熱交換器下流からの観察のため,熱交換器 の後ろのフィン端しか観察することができな い。中性子ラジオグラフィでは、(a)の写真の 右側からフィンに対して垂直に中性子を照射し ており、(b) に示すフィン表面での着霜量分布 を求めることができる。着霜量分布より、画像 右側のフィン及びチューブの上流側において多 量の着霜が確認され、チューブの後流のフィン 上では着霜量が少ないことが観察される。熱交 換器の下流部から観察した着霜写真では評価で きなかった着霜量の分布、及びその時間変化を 測定することができた。

中性子ラジオグラフィの撮影は5分ごとに行った。着霜量分布の各画素の時間変化から,単 位時間当たりの着霜の増加量を算出し,物質伝 達率分布を算出することが可能である。図5 (c) に物質伝達率分布を示す。チューブ前縁に て高い物質伝達率を示すが,フィン上では一様 な値を示す。これにより霜成長の評価が可能と なる。

### **3** 今後の展望

従来の着霜研究では,着霜量の測定におい て,実験後に霜を掻き取る方法や,実験装置に 電子天秤を組み込み直接計量する方法などしか なかった。中性子ラジオグラフィを用いること により,非接触で着霜量の分布の時間変化を捉 えることが可能であり,着霜研究の強力なツー ルとなる。今後,CT 再構成による熱交換器内 の3次元着霜量分布の評価や,霜の結晶構造と 霜密度との関係などについて研究を継続する予 定である。

また、霜成長とともに霜先端が融解し、その 水が霜層に浸透して再度凝固するが、着霜モデ ルの構築には、この水の挙動の把握が重要とな る。パルス中性子線の利用により霜層内の氷と 水の分布を取得できる可能性もあり、中性子ラ ジオグラフィが着霜研究の発展に寄与すること が期待される。

#### 【謝辞】

本研究は京都大学原子炉実験所平成23~24 年度共同利用研究(23P12-5,24P4-5)として 実施されたものである。

#### 参考文献

- 山下浩司,他,日本における着霜研究の技術小 史,技術史教育学会誌,10(1・2),31-36 (2009)
- 2) 中谷宇吉郎, 雪, 125-142, 岩波文庫 (1994)
- 山下浩司,着霜研究に関する動向,日本冷凍 空調学会論文集,27(3),199-210 (2010)
- 下村信雄,他,強制対流下の単一平板上での 着霜現象に関する研究,日本冷凍空調学会論 文集,19(3),245-254 (2002)
- 5) Trammel, G.J., Little, D.C., and Killgore, E.M., A

Study of Frost Formed on a Flat Plate Held at Subfreezing Temperature, *ASHRAE Journal*, 42–47 (1968)

- Cremers, C.J., *et al.*, Frost Density Measurements on Vertical Cylinders by Gamma-ray Attenuation, *Advances in Cryogenic Eng.*, 23, 371–375 (1978)
- 7) Bong, T.Y., et al., Comparison of Beta-ray and Gamma-ray Transmission Methods for Measurement of Frost Density Distribution, Experimental Thermal and Fluid Science, 4, 567–576 (1991)
- Matsumoto, R., et al., Quantitative Estimation of Frost Formation on Plate-fin Tube Heat Exchanger by Neutron Radiography, Proceedings of the International Heat Transfer Conference IHTC-15, IHTC15–9144 (2014)
- 9) Kiyanagi, Y., Recent Progress of Pulsed Neutron Imaging, Neutron Imaging Workshop, http://www. rri.kyoto-u.ac.jp/neutron/optics/workshop/ 20110106/index.html