関西大学理工学会誌
理工学と技術
Vol.25(2018)

解　説

放射線を用いた計測技術による「霜」研究の新たな展開

松本亮介*

Novel development on the frost research with radiography

Ryosuke MATSUMOTO

1．霜

「霜」を見たことがあるでしょうか？冷凍庫の壁や、お寿司屋さんのネタケース内の冷却パイプに付いている、白色の氷の結晶です。「霜」とは、空気中に含まれる水蒸気が0℃以下の冷却面に接して液体となり、それが凍結する、もしくは水蒸気が昇華して固体となり、氷の結晶として堆積したものです。(土の中の水分が凍結して作られる霜柱とは異なります)。図1に-20℃の冷却面に形成した霜の拡大写真を示します。針状や樹枝状の氷の細かな結晶が絡み合い、冷却面を覆うように層を成していることから、「霜層（しもそう)」とも呼ばれます。

霜層は、細かな氷の結晶と空気から構成されています。結晶と結晶の間は、多数の細孔が存在し、霜層の体積中の80～95%は空気です（この空気の体積割合を「空隙率」と言います)。そのため熱伝導率は極めて低く、熱の移動が阻害されます。冷蔵庫やエアコンの主要部品である「熱交換器」の表面に着霜（ちゃくそう）すると、霜層の熱伝導率の低さから、熱交換器の伝熱性能が悪化し、消費電力が増加します。冬に着るセータは、繊維内の空隙率が高いことで熱移動を阻害して保温性を良くするのですが、これではまるで熱交換器に「霜のセータ」を着せて、熱移動を悪くしているのと同じこととなります。

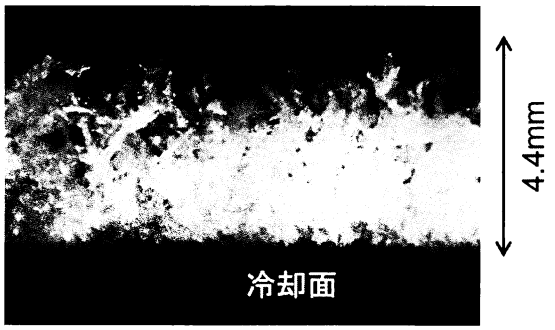


図1　単一平板上の強制対流下霜層
（冷却面温度－20℃、空気温度22℃）

図2に冷蔵庫の熱交換器での着霜の様子を示します。冷蔵庫に保管する食材は、水分を多く含みますので、およそ24時間で図2に示すように熱交換器全体に霜が付きます。付着した霜を間欠的に取り除くため、熱交換器周囲のダンパーを閉じ、熱交換器下部に設けた電気ヒータで、一時的にですが、熱交換器の周囲を約80℃近くまで加熱し、霜を融かして除霜(じょそう)します。

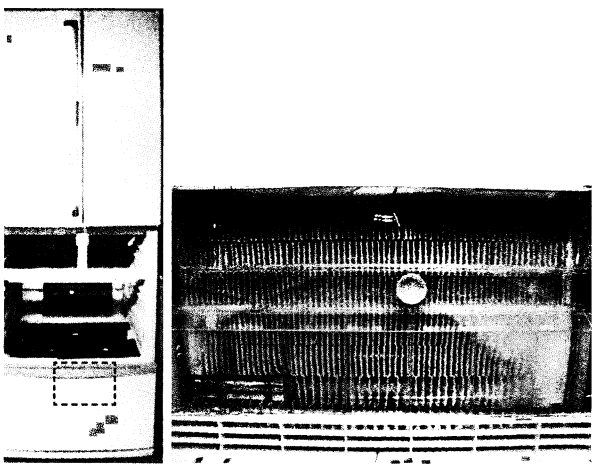


図2　家庭用冷蔵庫での熱交換器の着霜の様子
（冷凍室背面側の破線四角の領域が熱交換器）

原稿受付　平成30年7月6日
*システム理工学部 機械工学科 教授

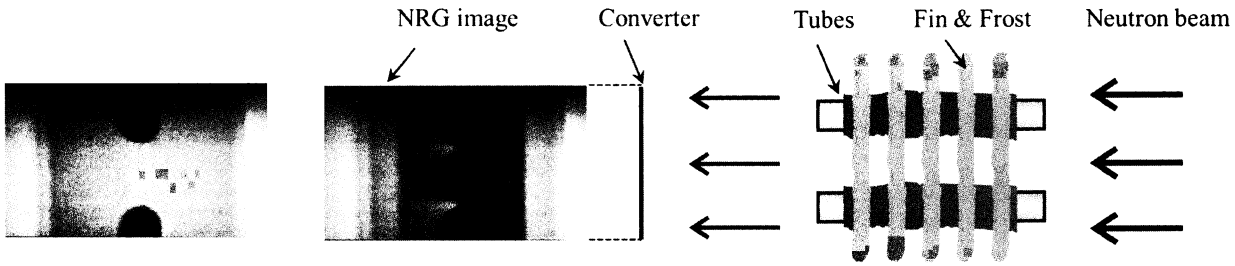


図3　中性子ラジオグラフィの概要

暖房運転時のエアコンの室外機にも、着霜します。暖房時には、室外機の熱交換器の内部には、低温の冷媒が流れるため、熱交換器に霜がつきます。そのため、およそ30～90分おきに除霜運転に切り替わります。除霜時には、室外機を温める状態(冷房運転と同じ状態)に切り替えるため、その間は室内機から暖かい風は出てきません。(エアコンの暖房運転時に、時折発生する「プシュー」という音は、除霜運転のために冷媒の流れが切り替わる際に発生する音です。)

このように、着霜による伝熱阻害と除霜時の消費電力が原因で、エアコンや冷蔵庫の消費電力は約25%増加しているとの報告があります[1)]。家庭用冷蔵庫やエアコンだけでなく、大型産業用冷凍機、自動車用エアコンにおいても着霜による効率の低下は、切実な問題です。しかしながら、現在のところ、着霜を長期間にわたり防止する方策がなく、冷凍空調産業の分野においては、着霜のメカニズムの解明、そして着霜の防止策の開発は、省エネルギー社会に向けた解決すべき緊急の課題の一つです。

霜の研究を行う際には、着霜量や霜層の空隙率を計測する必要があるのですが、着霜量を計測においても、着霜後に霜を掻き取るしか方法がありません。霜層の空隙率については、0.5mm毎に冷却したカミソリで霜層を削り取って計測した研究報告[2)]しかありません。

著者らは、放射線を用いた計測を霜研究に応用することで、熱交換器に付いた霜の分布を、非破壊で、連続的に計測することに成功しました。本報では、中性子ラジオグラフィを用いた着霜分布計測について説明します。さらに、X線マイクロCT装置を用いて、霜層の微細構造をマイクロスケールで観察した研究について、解説します。

2．中性子ラジオグラフィを用いた熱交換器の着霜分布計測[3)、4)]

ラジオグラフィは、放射線を用いて物体内部の構造を透過像として撮影する方法です。健康診断での「レントゲン写真」もラジオグラフィの一つです。放射線の一種である中性子線は、水分子に対しては強く減衰し、アルミニウムに対してはほとんど減衰しません。その特性を利用して、図3に示すように、着霜したアルミニウム製の熱交換器に中性子線を照射し、コンバータにより可視光に変換すると、霜が付いた箇所は中性子線が減衰されて「影」となって表れ、画像処理を行うと、その減衰の強さから着霜量の分布を定量的に評価することができます。(図3では、冷却に不凍液(ナイブライン)を用いているため、チューブ内のナイブラインによる「影」も見えています。)

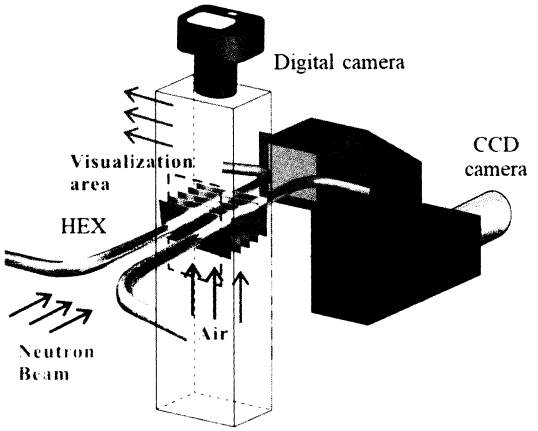
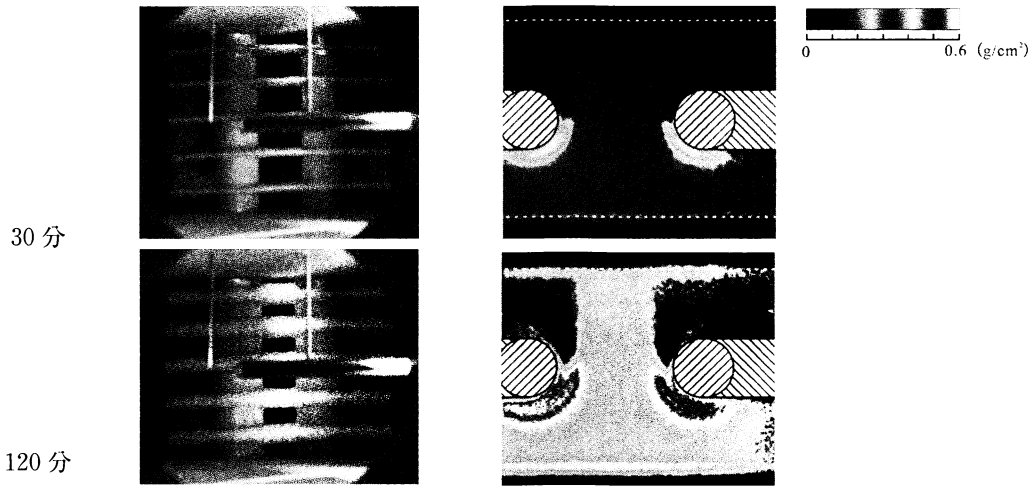


図4　中性子ラジオグラフィの撮像系
(熱交換器のフィンに対して垂直に中性子線を照射し、コンバータで可視光に変換後、CCDカメラでラジオグラフィ画像を撮影する。実験では、下流側からデジタルカメラでも霜を撮影。)

実験は、大阪府泉南郡熊取町の京都大学複合原子力科学研究所のB-4照射室にて実施しました。約5℃の湿り空気を循環させた風洞内に、家庭用冷蔵庫用プレートフィンチューブ熱交換器の一部を設置しました。熱交換器は60mm×28mm、厚み0.12mmのフィンを有するアルミニウム製で、外径8.5mmのチューブ2本の内部には-19℃のナイブラインを流し、着霜させています。図4示すように、中性子線はフィンに対して垂直に照射しました。また、下流側からデジタルカメラで着霜の様子も撮影しています。



（a）熱交換器下流側からの着霜写真（b）着霜量分布（空気の流れ方向は図下から上方向）

図5　熱交換器下流側からの着霜写真と中性子ラジオグラフィによるフィン上の着霜量分布

図5に、着霜開始から30分後、および120分後のデジタルカメラによる熱交換器下流側からの着霜写真と、中性子ラジオグラフィによる着霜量分布を示します。着霜写真中央の棒は湿度計です。図5（b）着霜量分布においては、空気は図の下から上方向に流れています。図5（b）の着霜量分布より、30分後にはフィン全面、およびチューブの上流側での着霜が確認されます。120分後では、画像下側のフィン前面およびチューブの上流側において多量の着霜が確認され、チューブの下流のフィン上では着霜量が少ないことが観察できます。熱交換器の下流部から観察した図5（a）の着霜写真では評価することができない着霜量の分布、およびその時間変化を測定することができました。また、中性子ラジオグラフィより求めた5分毎の着霜量分布の差を求めることで、熱交換器の局所の着霜の増加量を求めることが可能です。霜の成長速度を表す熱交換器での物質伝達率分布を、世界で初めて評価することに成功しました[3)]。

3．X線マイクロCTを用いた霜層の3次元微細構造の計測[5)]

霜層は氷の結晶と空気から成る一種の多孔質層です。その空隙率（もしくは、霜層の見かけの密度である霜密度）は霜の主要な物性値の一つであり、霜層の成長をシミュレーションするための計算モデルにも必要です。密度分布は霜層の厚さ方向にも分布を持ちますが、計測の困難さから測定例は少ない[2)]です。また、近年、着霜の遅延化、霜の成長抑制を目的とした熱交換器の表面処理や微細加工などの技術[6),7)]が研究されています。霜の成長抑制には、霜の微細構造の解明が重要ですが、顕微鏡観察では霜層の表面は観察できても、その内部の構造の観察は不可能です。そこで、着霜現象の基礎研究として、直径6 mmの冷却面に着霜を行い、X線マイクロCT撮影を行うことで、冷却面上の霜層の3次元微細構造を計測しました。

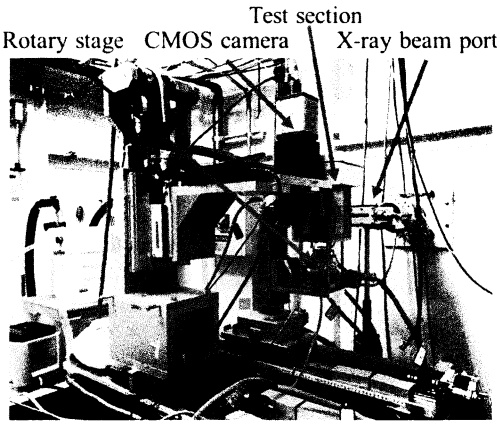


図6　X線マイクロCT実験装置
（SPring-8 BL20B2ビームライン）

X線マイクロCTは、医療用で用いられているCTスキャナと原理は同じです。対象物を180°回転させて多数のX線透過画像を撮影し、コンピュータ上に再構成することで、3次元構造を調べることができます。その撮影視野は狭い反面（本研究では5.6mm立法）、μmスケールでの空間分解能の高い（本研究では2.74 μm）3次元計測が可能なことが特徴です。市販のX線マイクロCTシステムもありますが、霜の計測に用いる場合、計測中に霜の融解や成長を避けるため、高速で撮影ができるようX線源が高輝度であることが必要となります。本研究では、兵庫県佐用町にあるSPring-8のBL20B2ビームラインにて実験を実施しました。

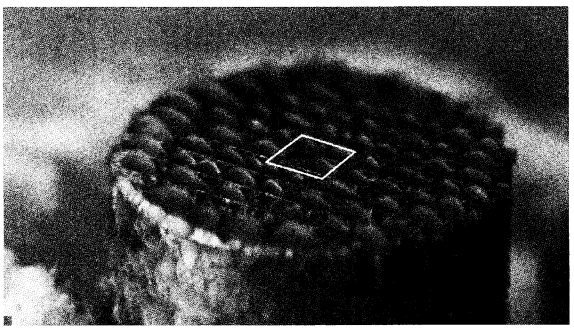
図6に実験装置の写真を示します。冷却配管などの取り回しの都合上、実験ハッチ外にて冷却面に着霜させた後、テストセクションをX線マイクロCTの回転ステージにセットして撮影を実施します。冷却面には、着霜抑制に効果的であるとの報告7）があった微細溝加工(0.25mm溝幅、0.7mm溝深さ、0.5mm溝ピッチ）を施しました。

デジタルカメラにて撮影した着霜の様子を図7に示します。着霜開始後、冷却面の凸面に凝縮液滴が発生し、着霜開始後4分では、凸面の冷却液滴が凍結します。その後、凍結した液滴から霜が発生し、10分後には霜が冷却面全面を覆いました。10分間の着霜の後、テストセクションをX線マイクロCTの回転ステージに設置し、回転ステージが180°回転する間に600枚のX線透過画像を撮影します。着霜終了後から撮影が完了するまで105秒を要し、その間の霜の融解は確認されませんでした。

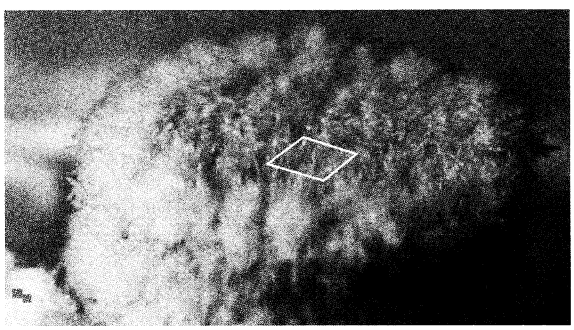
600枚のX線透過画像をコンピュータ上で再構成して求めた冷却面に平行な霜層の断層画像を、図8に示します。冷却面より100μmの断層画像では、冷却面上に付着した霜発生の核となる楕円形の氷滴が観察されます。その上方の400μmでは、針状の霜の断面が確認されます。

図7、8中の白い四角枠内の3次元霜構造を図9に示します。溝に対して垂直な断面を表します。冷却面上の氷滴から多数生じた柱状の霜結晶による密な霜層の上に、比較的大きな霜結晶による疎な霜層が形成されていることがわかりました。これらは結晶構造の違いから、氷滴部、柱状結晶部、樹枝状結晶部の3つの領域に分類することができます。

このように、霜層へのX線マイクロCT撮影を行うことで、霜層の3次元微細構造の取得に成功しました。さらに、計測した3次元データより氷結晶の割合を求めることで、霜層密度を評価し、霜の結晶構造と霜層密度の関係を求めることが可能です。

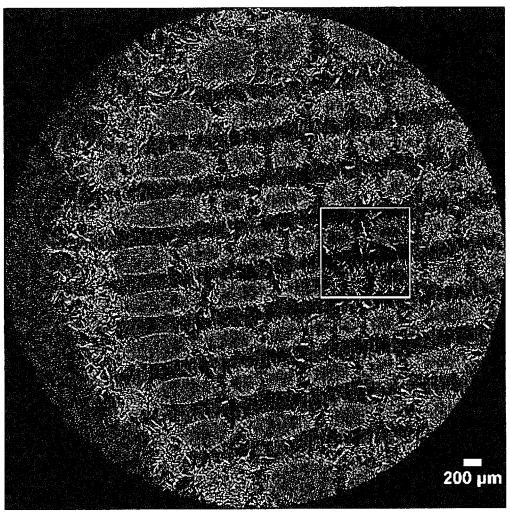


(a) 着霜開始後4分

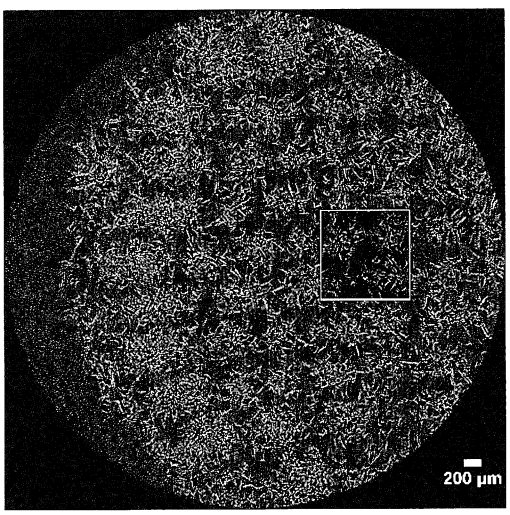


(b) 着霜開始後10分

図7 直径6mmの冷却面での着霜写真
(0.25mm溝幅、0.7mm溝深さ、0.5mm溝ピッチの微細溝加工付き。図中の白枠は図9に示す領域。)



(a) 冷却面から100μmの霜層の断層画像



(b) 冷却面から400μmの霜層の断層画像

図8 着霜後10分の霜層断層画像
(図中の白枠は図9に示す領域)

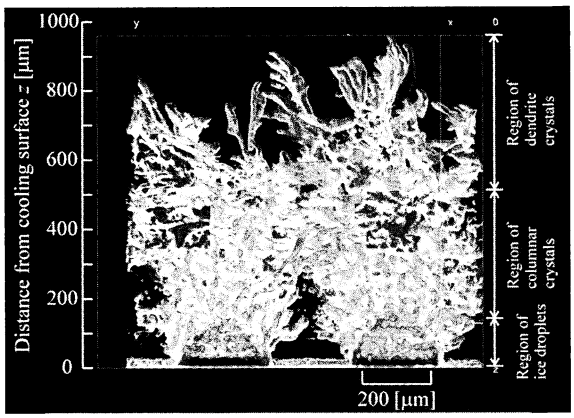


図9　霜層の3次元微細構造
（図7、8の白枠の領域。溝に垂直方向の断面）

4．おわりに

従来の霜研究では、着霜量の測定においても、実験後に霜を掻き取る方法などしか方法がありませんでしたが、ラジオグラフィ技術を用いることで、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ります。また、X線マイクロCTは、霜層の霜μmスケールでの微細構造を3次元でとらえることができ、霜成長の抑制を目指した熱交換器の表面処理や微細加工の評価に最適なツールと言えます。今後の着霜研究の発展への放射線を用いた計測方法の寄与が期待されます。

本研究の一部は、京都大学原子炉実験所 共同利用研究平成23年度（23P12-5）、平成24年度（24P4-5）、として実施しました。また、公益財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI）の承認を受け、Spring-8共用ビームライン利用研究の一般課題（2016A1225）としてBL20B 2ビームラインで実施されました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

[1] 張莉，藤縄剛史，斎川路之：平成23年7月電力中央研究所 研究報告 M11001, p.16, (2011).
[2] 下村信雄，熊田雅弥，儲仁才，水野敏之：冷空論，19（3），245-254（2002).
[3] R. Matsumoto, T. Yoshimura, H. Umekawa, T. Ami, D. Ito and Y. Saito: Proceedings of Int. Heat Transfer Conf. IHTC-15, IHTC15-9144, Kyoto（2014）, doi: 10.1615/IHTC15.hex.009144.
[4] 松本亮介，吉村智也，梅川尚嗣，網健行，伊藤大介，齊藤泰司：冷空論，32（4），419-426（2015).
[5] R. Matsumoto, T. Uechi and Y. Nagasawa : Journal of Thermal Science and Technology, Vol.13, No.1 (2018), pp. JTST0014.
[6] F. Wang, C. Liang, M. Yang and X. Zhang: Exp. Therm. Fluid Sci., 61, 113-120 (2015).
[7] 大久保英敏，松下将，池本駿：冷空論，31（1），19-26（2014).