

[22031]

中性子ラジオグラフィを用いた着霜・除霜のメカニズムの解明 Elucidation of Frosting and Defrosting Mechanisms by using Neutron radiography

木村駿斗^{A)}, 松本亮介^{#,B)}, 黒田陸斗^{A)}
Shunto Kimura^{A)}, Ryosuke Matsumoto^{#,A)} and Rikuto Kuroda^{A)}
^{A)} Graduate School of Science and Engineering, Kansai University
^{B)} Mechanical Engineering, Kansai University

Abstract

Frost formation on the heat exchanger causes the thermal resistance for the heat transfer performance. In this study, the frost distribution on the heat exchanger used in the commercial heat pump system was evaluated by neutron radiography imaging. At the initial stage of the frost formation, the frost formed in the upstream side of the heat exchanger. The frost deposition process was depended on humidity of the inlet air.

Keyword: Frost, Heat exchanger, Neutron radiography

1. 緒言

地球環境保護の観点、また世界情勢の観点から、化石燃料の燃焼時の熱エネルギーに頼らないヒートポンプによる暖房の利用が、特にヨーロッパにおいて加速している。しかし、外気温が低い場合、室外機の熱交換器に着霜が生じ、熱交換器の伝熱性能の低下を引き起こす。着霜は、霜層が氷と空気からなる多孔質層であるため、等価熱伝導率の低さにより熱交換器の熱抵抗が増加し、また、空気側の圧力損失も増加することで機器の伝熱性能の低下を招くため、着霜の抑制や制御が求められている。これら課題の解決策として着霜時の着霜分布の把握、除霜時の融解水挙動の把握や残留水の低減が重要となっている。

本研究では、JRR-3 TNRF の中性子ラジオグラフィを用いて、ヒートポンプのフラットチューブ熱交換器での着霜分布と除霜時の融解水挙動を評価する。

2. 実験装置および方法

Fig. 1 に実験装置を、Fig.2 に実験時の写真を示す。熱交換器は中性子照射位置の高さ 1240 mm に設置した。熱交換器は高さ 225mm, フィン幅 24mm, フィン枚数 29 枚 (幅 45mm) から構成される扁平管 16 段のフラットチューブ熱交換器であり、発泡スチロール製矩形ダクト内に設置されている。テストセクション上部の空気供給部に空気温度調整用熱交換器と加湿器を設置し、ファンにより空気供給部内の空気を循環させることで空気温度と湿度を調整し、熱交換器へファンにより湿り空気を流入させる。空気温度および湿度は、ダクト入口出口部で K 型シース熱電対、湿度計プローブ (Vaisala, HMP7) により測定した。空気流速も同様にダクト出口部の中心で流速計により測定した。

照射室外の冷凍機 1 (トーマス科学器械, TRL-140) により -23.0 °C 温度調整されたナイブラインは、5 m のチューブを用いて照射室天井からテストセクション下部のプレート式熱交換器へマグネットポンプにより供給される。プレート式熱交換器を介してフロ

リナートを冷却し、DC モーター駆動のポンプ (スベック社, MY2-8000-MK) にて熱交換器へ流入される。冷媒温度は熱交換器の入口および出口にて K 型シース熱電対により測定される。なお、空気供給部内の熱交換器は、1.0 °C に設定した冷凍機 2 (東京理化学器械, CA-1115C) により冷却される。

-20 °C のフロリナートを熱交換器へ循環させ着霜開始する。照射された中性子は、シンチレータ (化成オプトニクス, NR 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 (Andor, iKon-L 936) で記録される。撮影は 2000 枚の連続撮影で設定し、各条件の開始と終了の時間と枚数を記録した。撮影間隔は撮影総枚数と経過時間からもとめた。露光時間は 1 秒である。

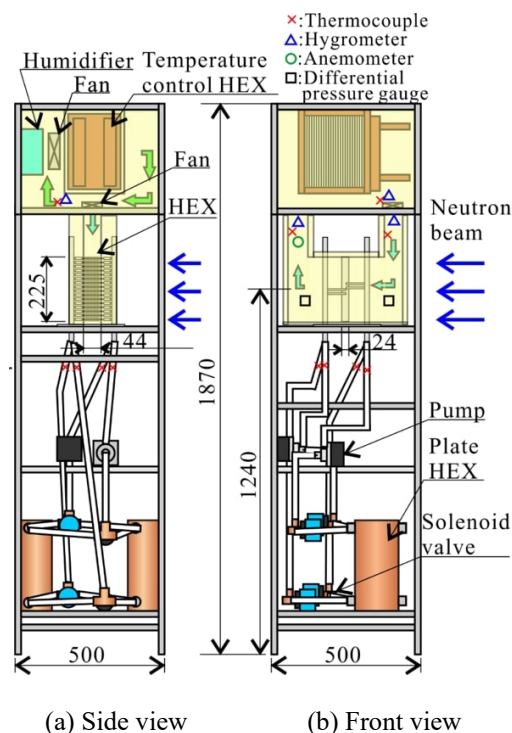


Fig. 1 Test section.

[22031]

3. 実験結果と考察

初期空気速度 1.0 m/s, 入口空気温度 2°C, 絶対湿度 0.004 kg/kgDA で相対湿度約 80%である低温高湿度条件での実験結果を Fig.3, 4 に示す. Fig.3 は着霜開始後 15 分後の着霜分布であり, Fig.3(a)は熱交換器正面から(空気流動方向), (b)は熱交換器側面(フィンに垂直方向)からの着霜分布を示す. 中性子ラジオグラフィ透過画像からの着霜量の定量化の方法は, 前報を参照されたい^[1].

Fig.4 に, 中性子ラジオグラフィ画像から算出した着霜水分量 m , 空気温度 T_{air} , 熱交換器を冷却するフロリナートの温度 $T_{coolant}$, 絶対湿度 χ , 熱交換器での空気側の圧力損失 Δp および風速 v の時間変化を示す. 実験は, 正面からの撮影と, 装置を 90° 回転させて側面からの撮影と別々に実施した. そのため, Fig.4 のグラフは, 赤色は熱交換器正面から撮影した際のデータ, 黒色は側面から撮影した際のデータを示す. 両者はほぼ一致している.

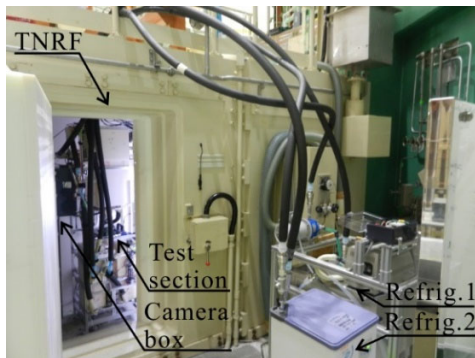
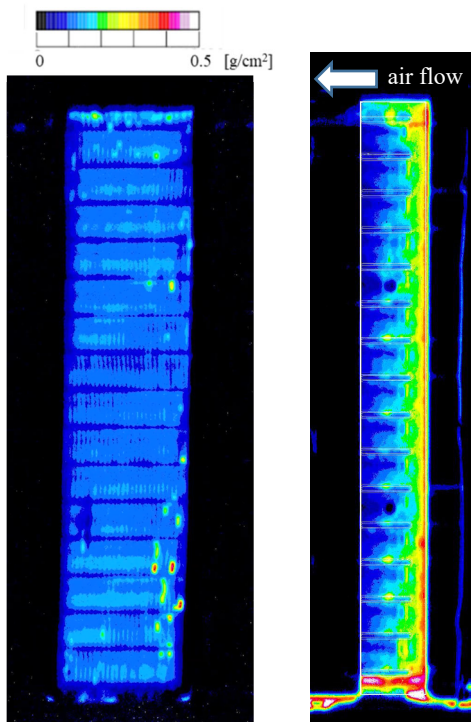


Fig. 2 Photograph of experimental setup.



(a) Front view (b) Side view

Fig. 3 Frost formation on the high humidity condition.

Fig.3 の着霜完了時の 15 分後の着霜分布より, (a) の正面の画像では, 熱交換器全体に均一な着霜がみられる. (b)の熱交換器側面の画像では, 熱交換器上流側での着霜が進み, 特にフィンエッジ部での着霜が顕著であり, 疑似カラーで赤色 (0.4g/cm²) の着霜量を示す. これは霜密度を 100kg/m³ と仮定すると約 40mm の霜層厚さに相当し, フィン 29 枚の 45mm 幅の熱交換器が霜層で閉塞していることを意味する.

Fig.4 では, 5 分後には霜層高さの増加により圧力損失が増加し始め, 出口空気温度の上昇が観察される. 5 分から 10 分の間では, 空気流速が低下すると同時に出口空気温度は入口空気温度に漸近し, 熱交換性能が急激に低下していることが伺える. これは, 高湿度条件であるため, 熱交換器のフィンエッジ部での着霜の成長により流路が閉塞することが原因である.

4. 結言

本研究では, 中性子ラジオグラフィを用いてフラットチューブ型熱交換器の着霜, 除霜評価を行った. 熱交換器のフィン前縁に着霜後, 熱交換器全体への着霜の様子がうかがえた. 除霜時には, 融解水の挙動が観察された.

参考文献

- [1] 黒田陸斗ほか, “中性子ラジオグラフィを用いた着霜の評価”, 2021 年度日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構施設利用共同研究一般共同研究成果報告書, 21025, 2022.

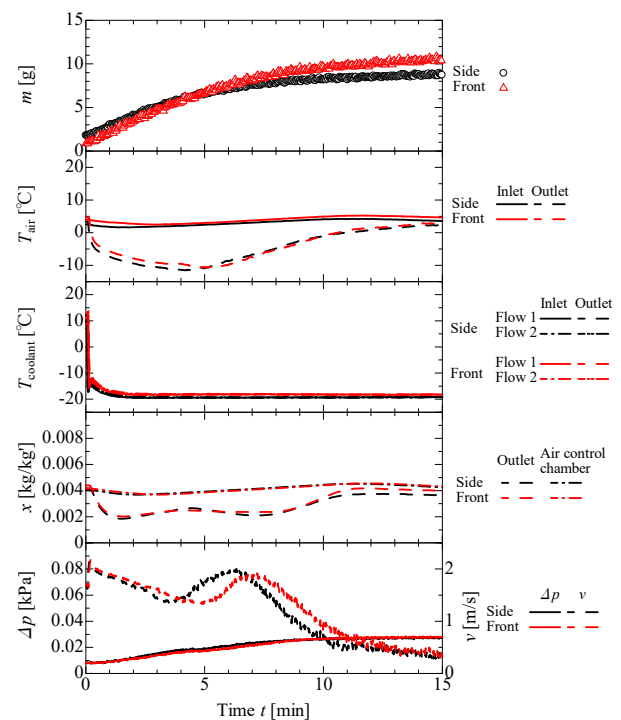


Fig. 4 Experimental results of water deposition, temperature, humidity, pressure drop and velocity.