

[21025]

中性子ラジオグラフィを用いた着霜の評価 Estimation of Frost formation by using Neutron radiography

黒田陸斗^{A)}, 松本亮介^{#B)}, 深井吾央^{A)}

Rikuto Kuroda^{A)}, Ryosuke Matsumoto^{#,A)} and Ao Fukai^{B)}

^{A)} Graduate School of Science and Engineering, Kansai University

^{B)} Mechanical Engineering, Kansai University

Abstract

Frost formation causes the thermal resistance for the heat transfer performance on the heat exchanger. In this study, the frost distribution on the heat exchanger used in the automobile air conditioning 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 deposited in the downstream region of the heat exchanger as time proceeds.

Keyword: Frost, Heat exchanger, Neutron radiography

1. 緒言

地球環境保護の観点から開発や市場導入が加速している電気自動車 (EV) では、エンジンの排熱が利用できないため、ヒートポンプによる暖房が有効な空調システムとして提案されている。しかし、着霜による空調のエネルギー負荷は、EV のバッテリーに大きな負担をもたらすことが指摘されている^[1]。

低温機器の熱交換器への着霜は、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、省エネルギー化に向けて着霜の抑制や制御が求められている。

このような背景のもと、本研究では JRR-3 TNRF の中性子ラジオグラフィを用いて、車載用熱交換器の着霜分布とその着霜過程の評価を行うことを目的とする。熱交換器の正面から中性子を照射することでフィン間の着霜過程を評価し、側面から照射することで熱交換器奥行き方向の着霜過程を評価する。

2. 実験装置および方法

Figure 1 にコルゲートフィン型熱交換器を示す。熱交換器は、平板状多穴管の間に波上のフィンがろう付けされて製作されている。低温冷媒が多穴管内を流れることで熱交換器が冷却され、フィン間を空気が通過することで熱交換が行われる。

Figure 2 にテストセクションを、Figure 3 に実験での写真を示す。熱交換器は中性子照射範囲に収まるよう高さ 1240 mm の位置に設置した。テストセクションは幅 195 mm、高さ 198 mm、奥行き 405 mm の矩形流路であり、熱交換器、流路は発泡スチロールにより断熱した。テストセクション上部から DC ファン (San Ace, 9HV1248P1G001)、温度調整用熱交換器により流速および温度が調整された空気が熱交換器へ供給される。テストセクションから流出した空気は照射室内に排出される。空気温度および湿度は、テストセクション上部および流路出口部で直径 1

mm の K 型シース熱電対、湿度計プローブ (Vaisala, HMP7) により測定される。空気流速も同様にテスト

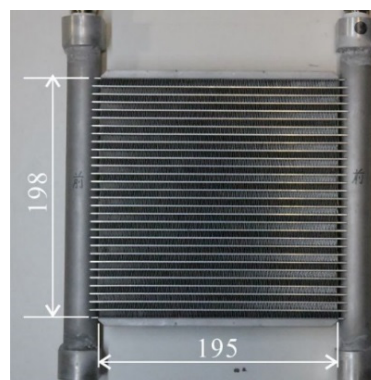


Fig. 1 Corrugated fin tube heat exchanger.

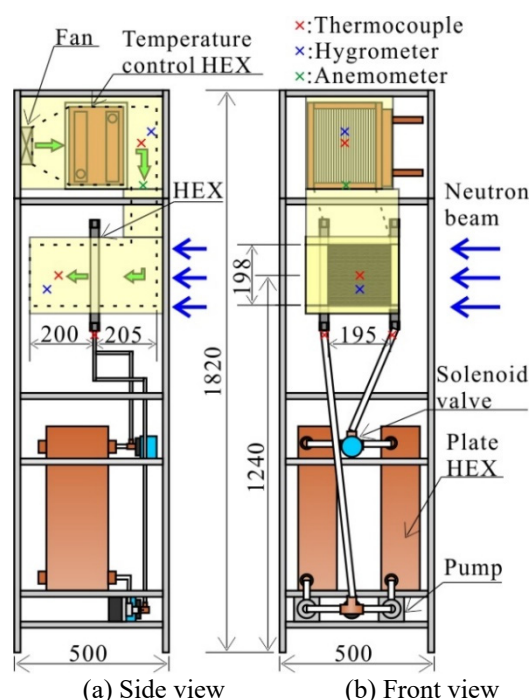


Fig. 2 Test section.

[#]E-mail: matumoto@kansai-u.ac.jp

[21025]

セクション上部で流速計 (KANOMAX, 6036-AO) により測定される。

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 (三和ハイドロテック, MMP11) 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 ポンプ (スペック社, 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。

Table 1 に実験条件を示す。1.0 $^{\circ}\text{C}$ に設定した温度調整用の冷凍機 2 (東京理化器械, CA-1115C) を作動させて予め空気を流し, 供給空気の温度と湿度が定常となったことを確認した後, 冷凍機 1 およびプレート式熱交換器により冷却された -17°C のフロリナートを熱交換器へ循環させ着霜開始する。着霜開始 30 秒前から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 10 秒ごとに行い, 露光時間は 0.5 秒である。中性子ラジオグラフィの撮影は 21 分 30 秒間である。

3. 実験結果と考察

3.1 画像処理

着霜前の中性子透過画像の輝度分布 S は, テストセクションによる減衰により次式で表される。

$$S = G \exp(-\rho_t \mu_{m,t} \delta_t) + O \quad (1)$$

霜が存在する場合, 水分による減衰が加わるため次式で表される。

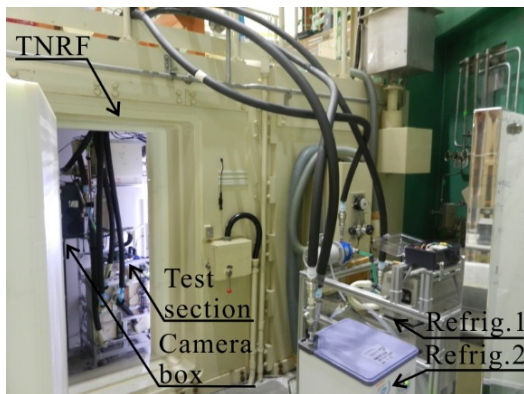


Fig. 3 Photograph of experimental setup.

Table 1 Experimental conditions

Coolant	-17°C
Air	5°C
Air velocity	1.1~1.3 m/sec
Exposure time	0.5 sec
Interval	10 sec

$$S = G \exp(-\rho_t \mu_{m,t} \delta_t - \rho_w \mu_{m,w} \delta_w) + O \quad (2)$$

G は中性子の照射ゲイン, O は撮像システムの暗電流のオフセットである。また, ρ [g/cm^3] は密度, μ_m [cm^2/g] は質量減衰係数, δ [cm] は透過厚さである。添字 t, w はそれぞれテストセクション, 水分を表す。水分の分布 m_w [g/cm^2] は Eq. (1), (2) により次式で表される。

$$m_w = \rho_w \mu_{m,w} = \ln \left(\frac{S - O}{S_0 - O} \right) \quad (3)$$

質量減衰係数は水の値 $\mu_m = 3.482 \text{ cm}^2/\text{g}$ を用いた。Eq. (3) の m_w は, 熱交換器の各フィンの着霜量の積算された水分量を表す。

3.2 実験結果と考察

Figure 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 , 温度 T , 湿度, 圧力損失 Δp および流速 u_{duct} の時間変化を示す。着霜水分量 m は, 正面撮影時と側面撮影時では大きく異なる。側面側の熱交換器透過厚さが 200 mm であり, 霜の密度が 100~200 kg/m^3 であることから, 霜で詰まった場合には水としての相当透過厚さが 20~40 mm となり, 中性子の減衰が大きすぎるため, 側面側の着霜量の定量評価ができていないと考えられる。ただし, 着霜の分布については定性的には評価できていると考える。

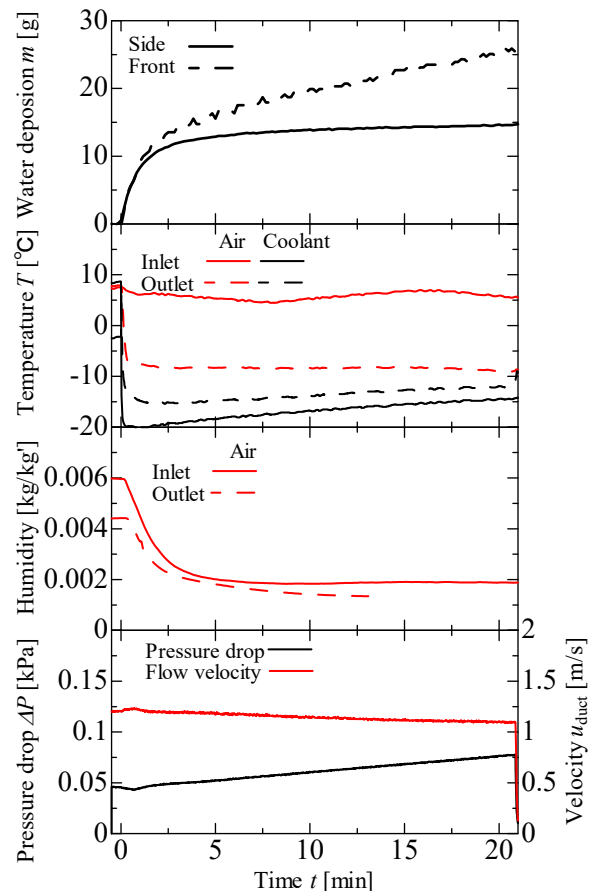


Fig. 4 Experimental results of temperature, humidity, pressure drop, velocity and frost deposition.

[21025]

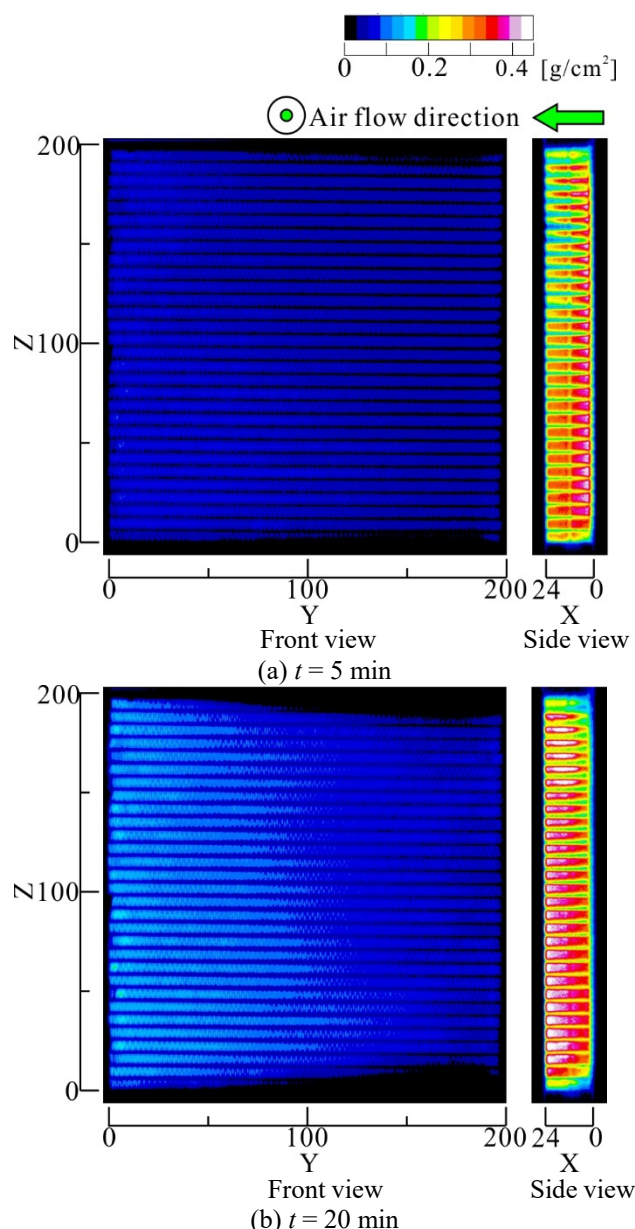


Fig. 5 Frost deposition distribution of front and side views.

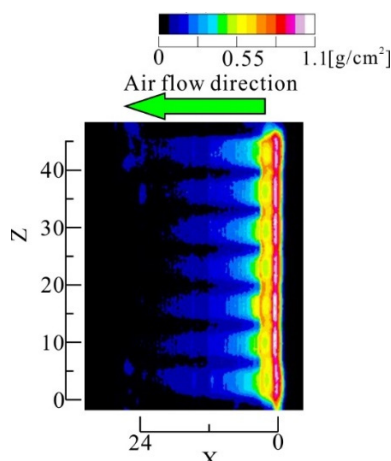


Fig. 6 Frost deposition distribution $t = 20$ min with high humidity condition measured at B-4 port KUR [2].

Figure 4 において、入口空気温度は約 7°C で一定であったが、熱交換器通過後の空気は、照射室に放出されるため、着霜開始後まもなく入口空気湿度の低下が見られた。着霜後、 $t = 5$ min 以降は、 0.002kg/kg' の低湿度条件となった。

Figure 5 に $t = 5$ min, $t = 20$ min での正面、側面から撮影された着霜分布を示す。Fig. 5(a) の $t = 5$ min では、均一に着霜していることが正面の画像より確認される。側面画像では、着霜初期で熱交換器上流エッジから着霜し、 $t = 5$ min では熱交換器全体に着霜するものの、熱交換器上流側での着霜が多い。

その後、 $t = 20$ min の正面画像では着霜に偏りが生じている。冷媒は左から右へ流れており、冷媒は熱交換器内を流れる際に温度が上昇し（入口と出口温度の差は $2 \sim 5^{\circ}\text{C}$ ）、着霜量に偏りが生じたと考える。側面画像では、熱交換器下流側での着霜が進行する。なお実験を通して、出口空気温度は -8°C 程度のほぼ一定を示しており、また、熱交換器による空気側の圧力損失の上昇も見られず、実験時間内で熱交換器性能は維持され、着霜による大幅な伝熱性能低下は見られなかった。

Figure 6 に、京都大学複合原子力科学研究所の B4 照射室で撮影した小型の熱交換器での着霜の様子を示す。入口空気湿度は 0.006kg/kg' で一定の条件で、それ以外の条件は、本実験とほぼ同じである。Figure 6 の高湿度条件では、熱交換器上流側のフィンエッジにて着霜が進行し、下流側での着霜はほとんど見られない。また、霜により熱交換器が閉塞したため、急激な圧力損失の上昇がみられた。

本実験結果の Figure 5(b) の低湿度条件では、熱交換器上流側のフィンエッジでの着霜が進行せず、閉塞が起こらなかったため下流側への着霜が進行したと考えられる。この着霜の違いにより、低湿度条件では高湿度条件より着霜による熱交換器の性能劣化を遅延させることが期待される。しかし、熱交換器内部での着霜は、除霜時に融解水が熱交換器に残留することも問題となっているため、着霜と除霜の評価を総合的に判断する必要がある。

4. 結言

本研究では、中性子ラジオグラフィを用いて車載用熱交換器の低湿度条件下での着霜評価を行った。その結果、以下のことが得られた。

着霜初期段階では、熱交換器の上流側で着霜が生じるが、フィン間の閉塞が起こらず、下流側へ着霜が進行した。21 分間の実験時間内では着霜による大幅な伝熱性能低下は見られなかった。

参考文献

- [1] I. Tsunoda, “熱交換器着霜時の EV ヒートポンプ性能”, Trans. of JSRAE, **37**(4), 417-421, (2020).
- [2] R. Kuroda, et al., “複合ラジオグラフィによる熱交換器の着霜評価”, Proc. of 2021 JSRAE Annual Conference, A122.