

中性子イメージングを活用した蒸発器内における冷媒沸騰挙動の解明

CLARIFICATION OF REFRIGERANT BOILING BEHAVIOR IN AN EVAPORATOR UTILIZING NEUTRON IMAGING

布施卓哉^{#,A)}, 岡村徹^{A)}, 井上誠司^{A)}, 松野孝允^{B)}, 岩田隆一^{C)}, 山内崇史^{C)}, 志満津孝^{C)},
松本吉弘^{D)}, 篠原武尚^{E)}, 甲斐哲也^{E)}, 上田健^{F)}, 村尾浩二^{G)}

Takuya Fuse^{#,A)}, Tohru Okamura^{A)}, Seiji Inoue^{A)}, Takayoshi Matsuno^{B)}, Ryuichi Iwata^{C)}, Takafumi Yamauchi^{C)},
Takashi Shimazu^{C)}, Yoshihiro Matsumoto^{D)}, Takenao Shinohara^{E)}, Tetsuya Kai^{E)}, Takeshi Ueda^{F)}, Koji Murao^{G)}

^{A)} DENSO CORPORATION, ^{B)} TOYOTA MOTOR CORPORATION, ^{C)} TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC

^{D)} CROSS Tohkai, ^{E)} J-PARC, ^{F)} Aisin Seiki Co., Ltd, ^{G)} TOYOTA BOSHOKU CORPORATION

Abstract

For downsizing of an evaporator used for a car air conditioning, comprehension of refrigerant boiling behavior is required. Because the evaporator is generally made from metal material (e.g. aluminum), now there is no way to visualize refrigerant boiling state directly. Although numerical simulation and thermoviewer analysis allow estimation of the boiling state, but not enough. We are trying to visualize refrigerant boiling state directly by utilizing neutron imaging, from the following viewpoints: Constituent metal material of the evaporator and gas refrigerant are transparent for neutron beam, on the other hand, liquid refrigerant can intercept the neutron. In this paper, our case study of neutron imaging for refrigerant boiling in an evaporator is disclosed.

1. 背景

1.1 カーエアコンの概要

自動車の車内快適性を向上するアイテムとして、カーエアコンが装備されている。Figure 1 のように、通常は、各パーツがユニット化されている。今後、車室空間を拡大したり、軽量化の要求等に対応するために、ユニット小型化の構想がある。ユニット構成において、冷熱生成のための蒸発器（以下、エバポレータと称呼）の体格が比較的大きく、その小型化が望まれている。

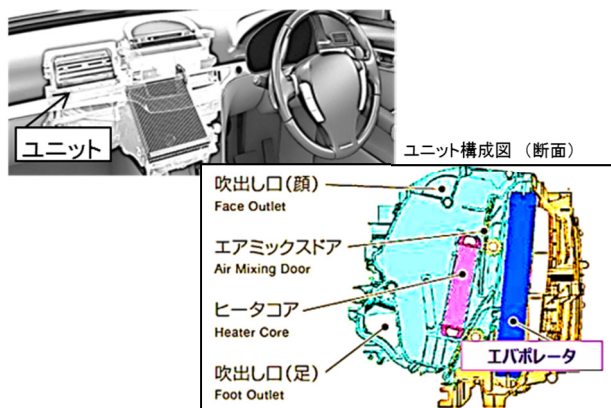


Figure 1: Unit configuration for a car air conditioning.

1.2 エバポレータ構造と小型化のポイント

Figure 2 は、一般的なエバポレータ外観と断面拡大図を示す。扁平チューブで形成される冷媒流路と、これに対して直行流となる空気流路とを備える。冷媒流路および空気流路は、フィンを介し交互積層されており、各流体が

分配されるようになっている。これにより、冷媒・空気間の熱交換面積の向上を狙っている。扁平チューブやフィン等の構成部材には、金属材料を用いる場合が多い。各流体の熱交換は、これらの部材を介するため、高熱伝導で加工容易なアルミ材の利用が好ましい。このように構成されたエバポレータでは、冷媒流路の内部にて、冷媒沸騰していく一方で、その潜熱で流入空気は冷却される。この結果、冷風供給が可能となる。この結果、車室内の冷房や除湿が達成される。

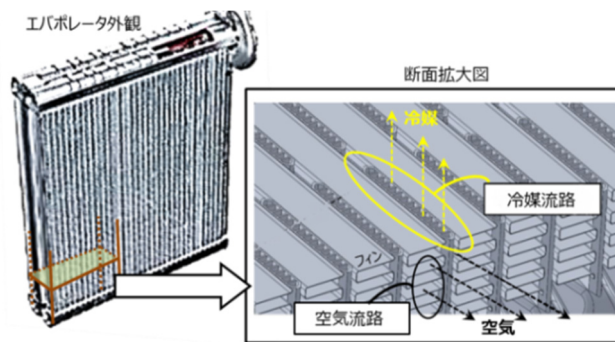


Figure 2: External appearance and detail sectional drawing of evaporator.

Figure 3 は、流路の模式図と伝熱モデルを示す。液状態の冷媒が、エバポレータ下部より流入する場合を考える。冷媒は各冷媒流路に分配されて、其々下から上に流れる。1つの冷媒流路で、流れと伝熱の関係に着目する。液状態の冷媒は、アルミ壁を介し空気から受熱する。従って、原理的には対流伝熱の形態となる。その熱移動量 $Q[W]$ は、熱伝達率 $h [W/m^2 \cdot ^\circ C]$ 、伝熱面積 $A [m^2]$ ・アルミ壁温 $T_w[^\circ C]$ と冷媒温度 $T[^\circ C]$ の温度差 $(T_w - T)$ の積で表される[1]。

[#]TAKUYA_FUSE@denso.co.jp

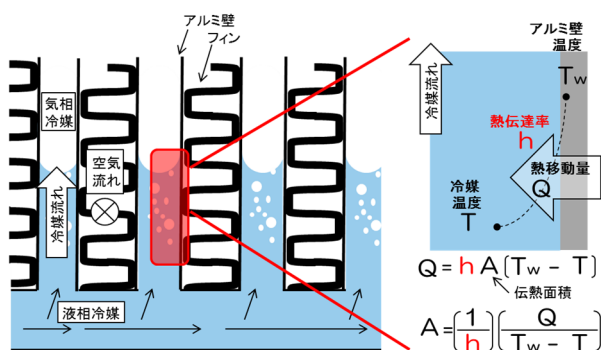


Figure 3: Schematic drawing of flow channel and heat transfer model.

小型化に向けては、所定の熱移動量 Q 、温度差 ($T_w - T$) に対し、伝熱面積 A を如何に小さくするかにかかっている。従って、熱伝達率 h を大きくすればよいことが解る。この熱伝達率 h は、流体の流れ方に大きく依存することが判っている[2]。特に、沸騰を伴う場合には 気液二相流の状態に応じて、熱伝達率 h が大きく変化する。

Figure 4 は、沸騰を伴う場合における熱伝達率 h と、気液二相流の状態との関係を表す図である。

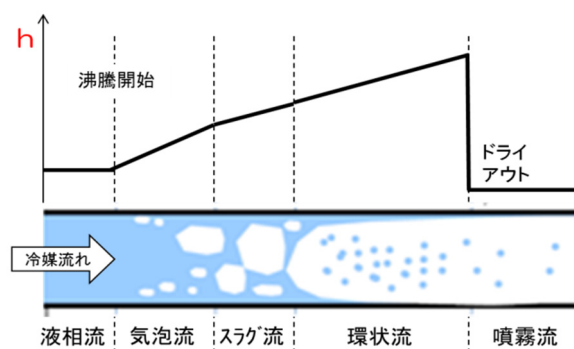


Figure 4: Relationship between boiling heat transfer coefficient and state of gas-liquid two phase flow.

冷媒流路において、その流れに沿って沸騰が進行していく。下流側に向かうほど、気相の占める割合が大きくなり、徐々に気液二相の状態が遷移していく。ある程度の気相の発生は、壁面での液相攪乱等を促進し、熱伝達率 h を大きくすることが判っている[3]。沸騰蒸発が更に進行すると、壁面でドライアウトして熱伝達率 h が急減することが想定される。ドライアウトに至る前の大きい熱伝達率 h を、積極的に利用できるようにすることが有効となる。このために、冷媒流路の内部における冷媒沸騰挙動の把握が、最も重要なポイントとなる。

2. 冷媒沸騰挙動の把握手段

2.1 現行手法による推定と課題

エバポレータは、アルミ材で構成されているため、通常は、冷媒流路の内部を直接可視化することが困難であった。このため、現行手法として、数値計算とサーモビューアを用い、冷媒沸騰挙動を推定した。

<数値計算による推定>

Figure 5 は、数値計算の一例を示している。ソルバーには、気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow を利用した[4]。エバポレータにおける一本の冷媒流路を模したモデルとした。冷媒・空気流量等の設定に際し、後述する模擬ベンチ作動条件から、流路1本あたりの収支を採った。冷媒を液滴状態(すなわち、ボイド率=0)として、計算開始した。この結果以下の点が判明した。

- ① 開始から 0.5 sec 以降で冷媒沸騰が確認され、2.5 sec で境界が明確に判定できた。その後、この境界はほぼ変動せず、ドライアウト領域は定常的にバランスした。
- ② 他流路においても、条件が同じであれば、沸騰挙動も一様と推測できる。

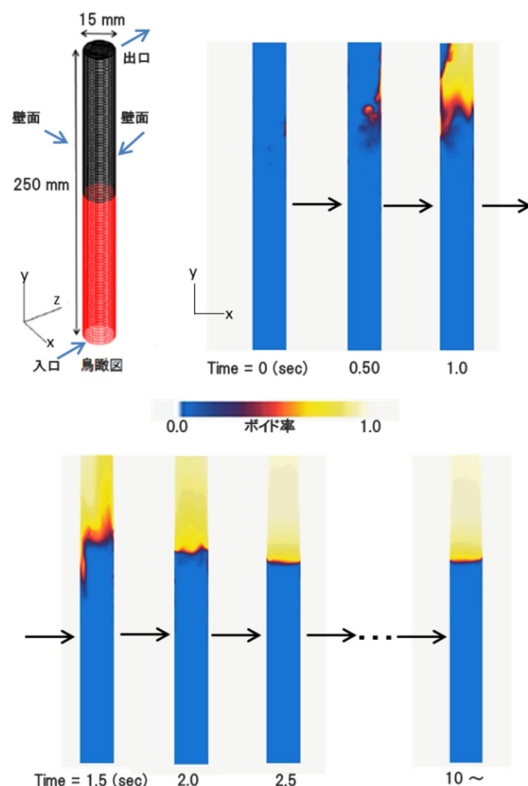


Figure 5: Numerical simulation of void fraction in single channel.

<サーモビューア計測による推定>

Figure 6 は、サーモビューア計測の一例を示している。後述する冷凍サイクル模擬ベンチを用い、同条件にて、エバポレータの表面温度を可視化した。冷媒流路での沸騰蒸発が進むほど、表面温度は低下すると予測される。このため、間接的ではあるが、何時・何処で蒸発促進されているか等、冷媒の沸騰挙動が推測可能と考えられる。チノーCPA-T400 を用いた像として、フレームレート 0.5 Hz 毎のキャプチャを連続 4 フレーム (i ~ iv) 示す。

- ① 冷媒流れ方向において、時間に対しランダムな温度変化を確認した。数値計算とは異なり、ドライアウト領域が変動している可能性がある。
- ② 多流路間にて温度分布の存在を確認した。沸騰挙動は各流路でランダムとなっている。

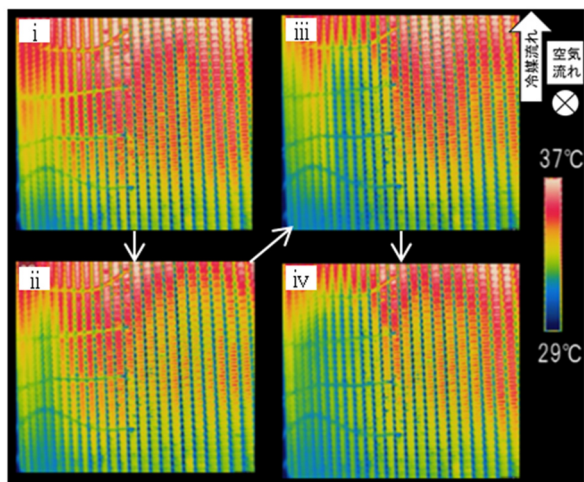


Figure 6: Thermoviewer image of evaporator surface.

数値計算・サーモビューア計測からは、冷媒沸騰挙動の推定が互いに異なる。この種の現行手法により推定するのは、既に限界であり、冷媒沸騰挙動を十分に把握できないと考えられる。やはり、内部を直接可視化せざるを得ない。課題は、エバポレータの構成部材や、冷媒沸騰に伴う密度変化を考慮した上で、沸騰挙動を直接可視化できる新手法を確立することにある。

2.2 新しい手法による可視化の提案

Figure 7は、エバポレータへの中性子照射による可視化コンセプト図を示している。冷媒流路においては、冷媒沸騰が進むと密度が減少する。一般に冷媒は水素を含むので、中性子線がエバポレータ外より照射された場合、アルミ等の金属は全て透過し、水素密度が大きい液相では遮断され、水素密度が小さい気相では透過し易くなる。すなわち、冷媒沸騰に伴い、液相から気相への遷移に応じて中性子線の透過量も増大すると考えられる。これを利用することで、冷媒沸騰挙動の直接可視化が期待できる。

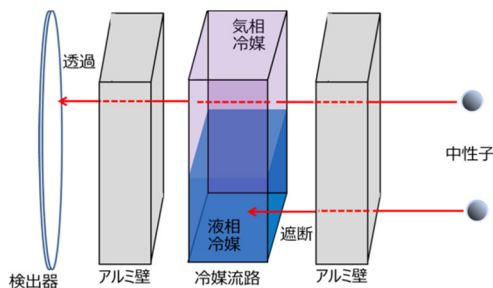


Figure 7: Conceptual drawing of direct visualization of refrigerant boiling state by utilizing neutron.

3. 中性子線を利用したエバポレータ内部における冷媒沸騰挙動の直接可視化

3.1 中性子線照射設備等の概要

Figure 8は、中性子線照射設備と、可視化にかかる主要構成の概要を示している。設備としては、JPARC 物質生命科学実験施設 BL22「螺鈿」を用いた[5]。「螺鈿」の特徴は、パルス中性子線でイメージング可能に構成さ

れている点であり、内部可視化の目的に沿っている。中性子線照射の態様は、出力 150W・パルス 25Hz である。エバポレータを含む冷凍サイクル模擬ベンチをステージに設置し、中性子線がエバポレータに照射されるようにセッティングした。撮像系には、EMCCD カメラ (Andor 社; 1024x1024 ピクセル) およびレンズ=150mm F/2.8 を用いた。中性子線パルスに合わせ、フレームレートを 25Hz に設定し、露光時間を 20 msec とした。

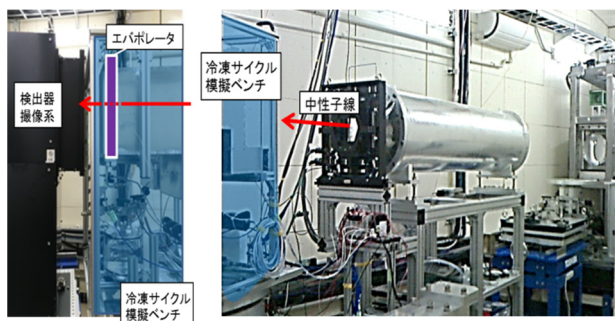


Figure 8: Overview of neutron beam irradiation facility (Beam Line 22 "RADEN" at JPARC/MLF).

3.2 ベンチセットアップ

Figure 9は、冷凍サイクル模擬ベンチのセットアップを示している。エバポレータを中心に、その後流にコンデンサ・タンク・ポンプ・流調弁が備えられ、密閉された冷媒回路が形成される。エバポレータのスケールは、横 170 mm×縦 250 mm×厚 17 mm であり、冷媒流路(即ち、扁平チューブ)は横方向に 25 本等間隔に積層される。冷媒回路には、HFE7000 (1,1,1,2,2,3,3-heptafluoro-3-methoxypropane)を冷媒として封入した。エバポレータおよびコンデンサには、其々ブロワで空気を導入可能となっている。エバポレータ側の導入空気のみ、ヒータ加熱可能となっている。ポンプの駆動により、液状態の冷媒がエバポレータに流入する。エバポレータには、温風も導入されるため、冷媒流路において冷媒蒸発する。気体状態の冷媒は、コンデンサに流入し冷媒凝縮した後、液体状態でタンクに貯留される。この一連が周期的に作動し、エバポレータでは継続的に冷媒蒸発しながら空気が冷却される。このように冷凍サイクルが模擬できるようになっている。このサイクル作動中に、エバポレータのみに中性子線照射されるよう、ベンチの位置関係を調整した。

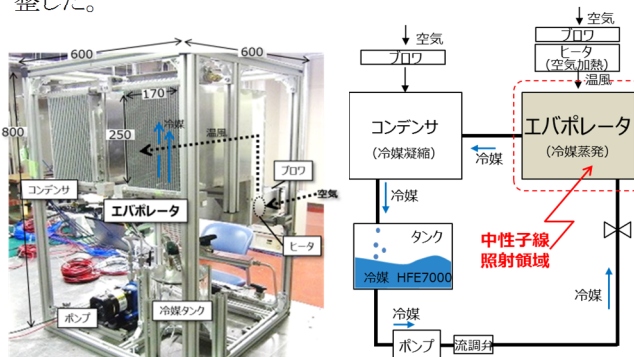


Figure 9: Setup of bench system which simulates a refrigeration cycle.

3.3 可視化結果

Figure 10 は、中性子による可視化結果の一例を示す。上記冷凍サイクル模擬ベンチの条件を、冷媒液流量 60 cc/min、ヒータ加熱量 800 W に設定した。センサ値が本設定値に定常的に推移した後に、エバポレータへ中性子線を照射した。なお、この条件は、上記サーモビューア計測時のものと同じである。可視化結果として、フレームレート 25 Hz 毎のキャプチャを連続 10 フレーム (i ~ x) で示している。フレーム内には、冷媒流路 10 本に相当する領域を示している。

<冷媒流路における液相・気相の判別>

各フレームにおいて、暗部および明部の差異を明確に捉えることができた。冷媒密度が大きい部位は暗部となり、小さい部位が明部となる。フレーム i 内の記載のように、暗部および明部は、液相および気相に対応し、暗部頂面が境界になると考えられる。本手法にて、冷媒の液相・気相の判別が可能であることを確認した。なお、今回のトライでは、暗明の傾斜が捉えられなかった。明度と密度の関係を明確化するためには、解像度の更なる向上が必要となり、中性子線の出力増大等で対応していく。

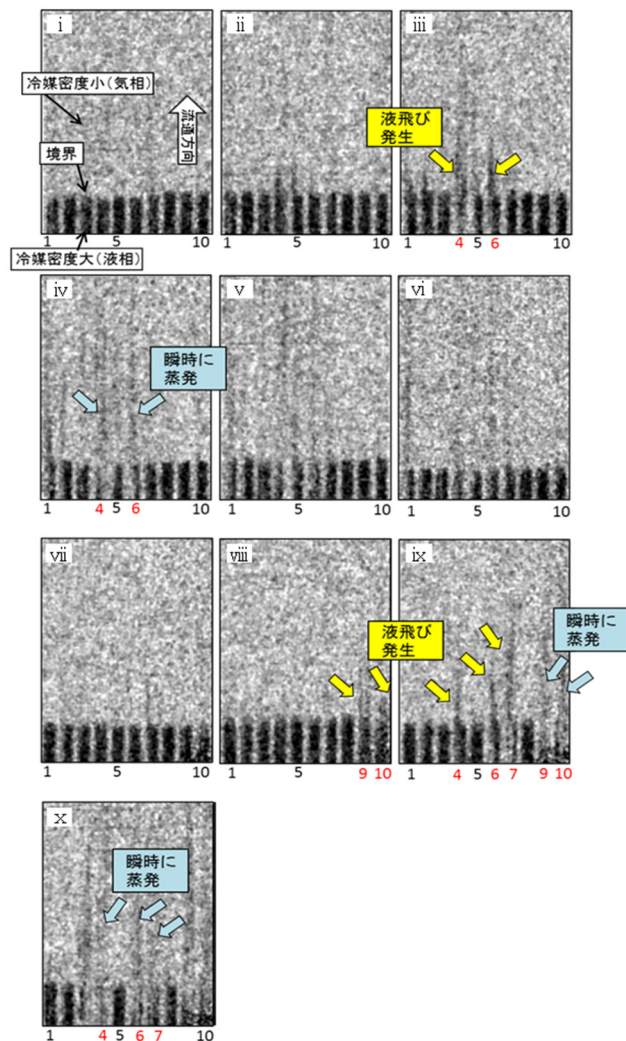


Figure 10: Neutron image of evaporator inside.

<エバポレータ内の冷媒沸騰挙動>

エバポレータ内部における冷媒沸騰挙動が、直接可視化により明らかとなった。以下、フレーム i ~ x のうち、特徴的な冷媒沸騰挙動を説明する。

- ① フレーム i においては、1~10 番の全て冷媒流路において、ほぼ面一な境界を持って、液相・気相領域が定存している。
- ② フレーム iii にて(フレーム i から 80 msec 後)、4 および 6 番目の冷媒流路から、冷媒の液飛びが発生した。
- ③ フレーム iv にて(フレーム iii から 40 msec 後)、液飛びを確認した 4 および 6 番目の冷媒流路にて、飛び出した液相が瞬時に蒸発し気相となった。
- ④ フレーム vii にて(フレーム i から 280 msec 後)、9 および 10 番目の冷媒流路から、冷媒の液飛びが発生した。
- ⑤ フレーム ix にて(フレーム vii から 40 msec 後)、液飛びを確認した 9 および 10 番目の冷媒流路にて、飛び出した液相が瞬時に蒸発し気相となった。同時に、4、6、および 7 番目の冷媒流路から、冷媒の液飛びが発生した。
- ⑥ フレーム x にて(フレーム ix から 40 msec 後)、液飛びを確認した 4、6、および 7 番目の冷媒流路にて、飛び出した液相が瞬時に蒸発し気相となった。

4. まとめ

カーエアコン用エバポレータの小型化に向け、冷媒沸騰挙動の解明にトライした。中性子線は、エバポレータの構成部材や気相冷媒を透過する一方、液相冷媒で遮断されることを期待し、中性子イメージングを活用した。エバポレータの冷媒流路において、暗明部の差から液相・気相の判別が可能であった。また、液飛びや瞬時蒸発などの特異な冷媒沸騰挙動を、初めて捉えることができた。これらは、現行手法のみでは推定不可能なものであり、沸騰挙動解明に大きく近づくことができた。将来的には、この中性子イメージングの知見を、数値計算や温度計測と合わせ、エバポレータの設計に反映できるものにしていく。そのためにも、今後の主要課題の1つとして、明度と密度の関係を明確化に取り組んでいく。

参考文献

- [1] J.P. Holman, Heat Transfer 8th edition, ISBN 0-07-114320-3, 1997, pp. 218.
- [2] 大原 他, 日本機械学会論文集 B, Vol.56, No.526, 1990, pp.1721.
- [3] 山田 他, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.820, 2014, pp.1.
- [4] アドバンスソフト株式会社 web ページ;
http://www.advancesoft.jp/product/advance_frontflow_mp_fs
- [5] JPARC web ページ;
https://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ns_spec.html#bl22